



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**HODNOCENÍ FOTOBIOLOGICKÉ BEZPEČNOSTI
SVĚTELNÝCH ZDROJŮ PRO DOMÁCÍ POUŽITÍ**

PHOTOBIOLOGICAL SAFETY EVALUATION OF LIGHT SOURCES FOR HOUSEHOLD USE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Jelínek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Štěpánek

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Jakub Jelínek

ID: 163953

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Hodnocení fotobiologické bezpečnosti světelných zdrojů pro domácí použití

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vypracování literární rešerše týkající se světelných zdrojů a fotobiologické bezpečnosti
2. Měření spektrálních charakteristik vybraných světelných zdrojů pro domácí použití
3. Vypočet mezí ozáření měřených zdrojů a zhodnocení naměřených dat

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 27.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Štěpánek

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

JELÍNEK, Jakub. *Hodnocení fotobiologické bezpečnosti světelných zdrojů pro domácí použití* [online]. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119145>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. 57 stran. Vedoucí práce Jaroslav Štěpánek.

Děkuji panu Ing. Jaroslavovi Štěpánkovi za trpělivost, poskytnuté zdroje informací a rady při vedení mé bakalářské práce. Rovněž bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu a kvalitní zázemí, které jsem měl po celou délku mého studia, a také svojí přítelkyni za podporu a trpělivost v posledních chvílích před závěrečnými zkouškami.

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Hodnocení fotobiologické bezpečnosti světelných zdrojů pro domácí použití* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne:

.....

ABSTRAKT

Tato práce pojednává o fotobiologické bezpečnosti světelných zdrojů používaných pro osvětlení domácností.

Teoretická část práce se věnuje oblastem souvisejících s fotobiologickou bezpečností, jako například popisem základních funkcí zraku, popisem světelných zdrojů, a také způsoby měření a vyhodnocení. V praktické části je měřeno spektrum jednotlivých světelných zdrojů, ze kterého jsou následně vypočítány meze ozáření, podle kterých je zdroj zařazen do patřičné skupiny nebezpečí.

KLÍČOVÁ SLOVA: Fotobiologická bezpečnost; osvětlení domácnosti; světelný zdroj; LED; žárovka; zářivka; mez ozáření; ultrafialové záření; infračervené záření; nebezpečí modrého světla; neionizující záření

ABSTRACT

This thesis deals with the photobiological safety of light sources used for household lighting.

The theoretical part of the thesis is devoted to areas related to photobiological safety, such as the basic description of vision functions, the description of light sources, as well as methods of measurement and evaluation. In the practical part, the spectrum of individual light sources is measured, from which the irradiance limits are calculated, according to which the source is assigned to the appropriate group of hazards.

KEY WORDS:

Photobiological safety; household lighting; light source; LED; light bulb; fluorescent lamp; irradiance limit; ultraviolet radiation; infrared radiation; blue light hazard; non-ionizing radiation

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
1 ÚVOD	12
2 ELEKTROMAGNETICKÉ ZÁŘENÍ	13
2.1 NEIONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ.....	13
2.1.1 SVĚTELNÉ ZÁŘENÍ.....	13
2.1.2 ULTRAFIALOVÉ ZÁŘENÍ	14
2.1.3 INFRAČERVENÉ ZÁŘENÍ	14
3 ZRAK A VIDĚNÍ.....	15
3.1 ZRAKOVÉ ÚSTROJÍ.....	15
3.2 SPEKTRÁLNÍ CITLIVOST ZRAKU.....	16
4 SVĚTELNÉ ZDROJE PRO VŠEOBECNÉ OSVĚTLENÍ.....	17
4.1 ZÁKLADNÍ PARAMETRY SVĚTELNÝCH ZDROJŮ	17
4.2 SVĚTELNÉ ZDROJE PRO DOMÁCNOSTI.....	18
4.2.1 TEPLOTNÍ ZDROJE	18
4.2.2 VÝBOJOVÉ ZDROJE	20
4.2.3 POLOVODIČOVÉ ZDROJE LED.....	21
5 ZÁKLADNÍ FOTOMETRICKÉ A RADIOMETRICKÉ VELIČINY.....	23
5.1 FOTOMETRICKÉ VELIČINY	23
5.2 RADIOMETRICKÉ VELIČINY	23
6 FOTOBIOLOGICKÁ BEZPEČNOST	24
6.1 FOTOBIOLOGICKÉ ÚČINKY SVĚTELNÉHO ZÁŘENÍ NA LIDSKÝ ORGANISMUS.....	24
6.1.1 CIRKADIÁNNÍ RYTMY	24
6.1.2 NEBEZPEČÍ MODRÉHO SVĚTLA	25
6.2 NEGATIVNÍ FOTOBIOLOGICKÉ ÚČINKY UV, VIDITELNÉHO A IR ZÁŘENÍ NA ZRAKOVÉ ÚSTROJÍ A KŮŽI	26
6.2.1 NEGATIVNÍ ÚČINKY UV ZÁŘENÍ.....	26
6.2.2 NEGATIVNÍ ÚČINKY SVĚTELNÉHO ZÁŘENÍ	27
6.2.3 NEGATIVNÍ ÚČINKY IR ZÁŘENÍ.....	28
6.3 MĚŘENÍ SVĚTELNÝCH ZDROJŮ	29
6.4 MĚŘENÍ INTENZITY OZAŘOVÁNÍ.....	29
6.5 MĚŘENÍ ZÁŘE	29
6.5.1 ALTERNATIVNÍ METODA	30
6.6 KLASIFIKACE SVĚTELNÝCH ZDROJŮ	30
6.6.1 SKUPINA BEZPEČNÝCH SVĚTELNÝCH ZDROJŮ	31
6.6.2 SKUPINA NÍZKÉHO NEBEZPEČÍ.....	31
6.6.3 SKUPINA STŘEDNÍHO NEBEZPEČÍ	31

6.6.4 SKUPINA VYSOKÉHO NEBEZPEČÍ.....	31
6.7 MEZE BEZPEČNÉHO OZÁŘENÍ	31
6.7.1 MEZ BEZPEČNÉHO OZÁŘENÍ KŮŽE A OKA UV ZÁŘENÍM.....	32
6.7.2 MEZ BEZPEČNÉHO OZÁŘENÍ OKA UVA ZÁŘENÍM.....	32
6.7.3 MEZ BEZPEČNÉHO OZÁŘENÍ SÍTNICE MODRÝM SVĚTLEM	32
6.7.4 MEZ BEZPEČNÉHO OZÁŘENÍ SÍTNICE MODRÝM SVĚTLEM - MALÉ ZDROJE	32
6.7.5 MEZ OZÁŘENÍ PRO NEBEZPEČÍ TEPELNÉHO POŠKOZENÍ SÍTNICE	33
6.7.6 MEZ OZÁŘENÍ PRO NEBEZPEČÍ TEPELNÉHO POŠKOZENÍ SÍTNICE - SLABÝ VIZ. VJEM.....	33
6.7.7 MEZ BEZPEČNÉHO OZÁŘENÍ OKA IR ZÁŘENÍM	33
6.7.8 MEZ OZÁŘENÍ PRO NEBEZPEČÍ TEPELNÉHO POŠKOZENÍ POKOŽKY	33
6.8 MĚŘICÍ PŘÍSTROJE.....	34
6.8.1 DVOJITÝ MONOCHROMÁTOR	34
6.8.2 ŠIROKOPÁSMOVÝ DETEKTOR.....	34
6.8.3 VSTUPNÍ OPTIKA	34
6.8.4 KALIBRAČNÍ ZDROJE.....	34
7 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ SVĚTELNÝCH ZDROJŮ A VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT.....	35
7.1 POSTUP MĚŘENÍ	35
7.2 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....	35
7.2.1 MĚŘENÍ LED MEGAMAN 11 W 2800 K WARM WHITE	36
7.2.2 MĚŘENÍ LED MEGAMAN 11 W 4000 K COOL WHITE.....	38
7.2.3 MĚŘENÍ LED MEGAMAN 11 W 6500 K DAY LIGHT	39
7.2.4 MĚŘENÍ REFLEKTOROVÉ LED OSRAM LED VALUE 5 W 2700 K	40
7.2.5 MĚŘENÍ REFLEKTOROVÉ LED OSRAM LED VALUE 3,6 W 4000 K	41
7.2.6 MĚŘENÍ REFLEKTOROVÉ LED OSRAM LED VALUE 3,6 W 6500 K	42
7.2.7 MĚŘENÍ LED FLAIR LED FILAMENT 2700 K WARM WHITE	43
7.2.8 MĚŘENÍ KLASICKÉ ŽÁROVKY PHILIPS 60 W.....	44
7.2.9 MĚŘENÍ KLASICKÉ ŽÁROVKY PHILIPS 200 W.....	45
7.2.10 MĚŘENÍ REFLEKTOROVÉ ŽÁROVKY TUNGSRFLEX R80 100 W	46
7.2.11 MĚŘENÍ HALOGENOVÉ ŽÁROVKY OSRAM HALOGEN ECO 105 W 2900 K	47
7.2.12 MĚŘENÍ REF. HALOG. ŽÁROVKY OSRAM DECOSTAR 51 ALU 20 W 2800 K.....	48
7.2.13 MĚŘENÍ REF. HALOG. ŽÁROVKY OSRAM DECOSTAR 51S 50 W 2950 K.....	49
7.2.14 MĚŘENÍ KOMPAKTNÍ ZÁŘIVKY OSRAM ENERGY SAVER 12 W 2700 K	50
7.2.15 MĚŘENÍ KOMPAKTNÍ ZÁŘIVKY OSRAM ENERGY SAVER 12 W 6500 K	51
7.2.16 MĚŘENÍ LINEÁRNÍ ZÁŘIVKY OSRAM LUMILUX L 18 W 6500 K.....	52
7.2.17 MĚŘENÍ LINEÁRNÍ ZÁŘIVKY SYLVANIA LUXLINE PLUS 18 W 3000 K	53
7.2.18 MĚŘENÍ INDUKČNÍ VÝBOJKY LVD JX 15 W 220 V	54
8 ZÁVĚR.....	55
POUŽITÁ LITERATURA	56

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Rozložení barev ve spektrální oblasti viditelného záření [3]</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 3-2 Poměrná spektrální citlivost zraku normálního fotometrického pozorovatele [12].....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 4-1 Rozdělení elektrických světelných zdrojů [7]</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 4-2 Žárovka a příklad jejího spektra [3]</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 4-3 Příklad barevného spektra zářivky [7]</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 4-4 Příklad spektra indukční výbojky [18]</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 4-5 Složení bílého světla z RGB LED [10]</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 6-1 Propustnost UV záření okem [6]</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 6-2 Propustnost IR záření okem [6].....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 6-3 Spektrální váhové křivky zohledňující závislost zdravotních účinků záření na oči a kůži na vlnové délce [8]</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 7-1 Měřicí pracoviště - optická soustava.....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 7-2 Změřené spektrum LED MEGMAN 11 W 2800 K.....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 7-3 Změřené spektrum LED MEGMAN 11 W 4000K.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 7-4 Změřené spektrum LED MEGMAN 11 W 6500K.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 7-5 Změřené spektrum reflektorové LED OSRAM LED VALUE 5 W 2700 K.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 7-6 Změřené spektrum reflektorové LED OSRAM LED VALUE 3,6 W 4000 K.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 7-7 Změřené spektrum reflektorové LED OSRAM LED VALUE 3,6 W 6500 K.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 7-8 Změřené spektrum LED FLAIR LED FILAMENT 2700K.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 7-9 Změřené spektrum klasické žárovky PHILIPS 60 W</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 7-10 Změřené spektrum klasické žárovky PHILIPS 200 W</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 7-11 Změřené spektrum reflektorové žárovky Tungsraflex R80 100 W.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 7-12 Změřené spektrum halogenové žárovky OSRAM HALOGEN ECO 105 W 2900 K</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 7-13 Změřené spektrum OSRAM DECOSTAR 51 ALU 20 W 2800 K.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 7-14 Změřené spektrum OSRAM DECOSTAR 51S 50 W 2950 K</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 7-15 Změřené spektrum kompaktní zářivky OSRAM ENERGY SAVER 12 W 2700 K</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 7-16 Změřené spektrum kompaktní zářivky OSRAM ENERGY SAVER 12 W 6500 K</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 7-17 Změřené spektrum lineární zářivky OSRAM LUMILUX L 18 W 6500 K.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 7-18 Změřené spektrum lineární zářivky SYLVANIA LUXLINE plus 18 W 3000 K.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 7-19 Změřené spektrum indukční výbojky LVD JX 15 W 220 V</i>	<i>54</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 5-1 Přehled základních fotometrických a radiometrických veličin [9].....</i>	<i>23</i>
<i>Tab. 6-1 Přehled možných negativních účinků záření na lidský organismus [6]</i>	<i>26</i>
<i>Tab. 6-2 Meze vyzařování pro skupiny nebezpečí u trvale vyzařujících zdrojů [8].....</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 7-1 Parametry měření LED MEGAMAN 11 W 2800 K.....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 7-2 Vypočtené meze ozáření LED MEGAMAN 11 W 2800 K.....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 7-3 Parametry měření LED MEGAMAN 11 W 4000K.....</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 7-4 Vypočtené meze ozáření LED MEGAMAN 11 W 4000K.....</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 7-5 Parametry měření LED MEGAMAN 11 W 6500K.....</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 7-6 Vypočtené meze ozáření LED MEGAMAN 11 W 6500K.....</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 7-7 Parametry měření reflektorové LED OSRAM LED VALUE 5 W 2700 K.....</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 7-8 Vypočtené meze ozáření reflektorové LED OSRAM LED VALUE 5 W 2700 K.....</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 7-9 Parametry měření LED OSRAM LED VALUE 3,6 W 4000 K.....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 7-10 Vypočtené meze ozáření reflektorové LED OSRAM LED VALUE 3,6 W 4000 K.....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 7-11 Parametry měření LED OSRAM LED VALUE 3,6 W 6500 K.....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 7-12 Vypočtené meze ozáření reflektorové LED OSRAM LED VALUE 3,6 W 6500 K.....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 7-13 Parametry měření LED FLAIR LED FILAMENT 2700K</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 7-14 Vypočtené meze ozáření LED FLAIR LED FILAMENT 2700K.....</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 7-15 Parametry měření klasické žárovky PHILIPS 60 W.....</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 7-16 Vypočtené meze ozáření klasické žárovky PHILIPS 60 W</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 7-17 Parametry měření klasické žárovky PHILIPS 200 W.....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 7-18 Vypočtené meze ozáření klasické žárovky PHILIPS 200 W</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 7-19 Parametry měření reflektorové žárovky Tungsraflex R80 100 W.....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 7-20 Vypočtené meze ozáření reflektorové žárovky Tungsraflex R80 100 W</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 7-21 Parametry měření halogenové žárovky OSRAM HALOGEN ECO 105 W 2900 K.....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 7-22 Vypočtené meze ozáření halog. žárovky OSRAM HALOGEN ECO 105 W 2900 K.....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 7-23 Parametry měření ref. halog. žárovky OSRAM DECOSTAR 51 ALU 20 W 2800 K.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 7-24 Vypočtené meze ozáření OSRAM DECOSTAR 51 ALU 20 W 2800 K.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 7-25 Parametry měření ref. halog. žárovky OSRAM DECOSTAR 51S 50 W 2950 K.....</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 7-26 Vypočtené meze ozáření OSRAM DECOSTAR 51S 50 W 2950 K.....</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 7-27 Parametry měření kompaktní zářivky OSRAM ENERGY SAVER 12 W 2700 K.....</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 7-28 Vypočtené meze ozáření kompaktní zářivky OSRAM ENERGY SAVER 12 W 2700 K..</i>	<i>50</i>

<i>Tab. 7-29 Parametry měření kompaktní zářivky OSRAM ENERGY SAVER 12 W 6500 K</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 7-30 Vypočtené meze ozáření kompaktní zářivky OSRAM ENERGY SAVER 12 W 6500 K..</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 7-31 Parametry měření lineární zářivky OSRAM LUMILUX L 18 W 6500 K</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 7-32 Vypočtené meze ozáření lineární zářivky OSRAM LUMILUX L 18 W 6500 K</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 7-33 Parametry měření lineární zářivky SYLVANIA LUXLINE plus 18 W 3000 K</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 7-34 Vypočtené meze ozáření lineární zářivky SYLVANIA LUXLINE plus 18 W 3000 K</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 7-35 Parametry měření indukční výbojky LVD JX 15 W 220 V</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 7-36 Vypočtené meze ozáření indukční výbojky LVD JX 15 W 220 V</i>	<i>54</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Název	Jednotka
Ω	Prostorový úhel	sr
I	Svítivost	cd
Φ	Světelný tok	lm
E	Intenzita osvětlení	lx
L	Jas	nt
I_e	Zářivost	$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$
Φ_e	Zářivý tok	W
E_e	Intenzita ozáření	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
L_e	Zář	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$
T_{cp}	Teplota chromatičnosti	K
R_a	Index podání barev	-
η	Měrný výkon	$\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$
λ	Vlnová délka	nm
α	Úhlové rozpětí	rad
L_λ	Spektrální zář	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$
E_λ	Spektrální intenzita ozařování	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$
$R(\lambda)$	Váhová funkce nebezpečí popálení sítnice	-
$B(\lambda)$	Váhová funkce nebezpečí modrého světla	-
$S_{UV}(\lambda)$	Váhová funkce nebezpečí ultrafialového záření	-
$\Delta\lambda$	Šířka pásma/spektra	nm
t	Doba ozáření	s
t_{\max}	Maximální doba ozáření	s
Zkratka	Název	
ČSN	Česká technická norma	
EN	Evropská norma	
CIE	Mezinárodní komise pro osvětlování	
IEC	Mezinárodní elektrotechnická komise	
UV	Ultrafialové záření	
IR	Infračervené záření	
LED	Světelné diody	

1 ÚVOD

Světlo patří mezi základní podmínky nezbytné pro život na zemi. Jako světlo označujeme tu část elektromagnetického záření, které je detekováno lidským zrakem. Oko, jakožto čidlo, dokáže zachytit toto záření, jeho prostorové rozložení a částečně i spektrální složení daného záření, z čehož vzniká zrakový vjem. Abychom dali zrakovému vjemu vzniknout, musíme nejdříve dát vzniknout světlu, a k tomu budeme potřebovat nějaký světelný zdroj. Nejvýznamnější světelný zdroj vždy byl, stále je a pravděpodobně bude i nadále slunce. Potřeba člověka fungovat i v místech a čase, kdy není možné zajistit potřebnou intenzitu světla ze slunečního svitu, jej donutila ke zkoumání a snaze o nalezení jiných světelných zdrojů. Takovým světelným zdrojem, který byl až do objevení žárovky (a ještě chvíli poté) primárním světelným zdrojem vyjma slunce, byl oheň. S již zmiňovanou žárovkou přišla revoluce v umělém osvětlování a světelná technika je dnes součástí každodenního života obyvatel vyspělých zemí. V dobách prvních žárovek se bezpečnosti vyzařovaného světla nevěnovala žádná pozornost, avšak s postupem času, jak vznikaly stále nové a dokonalejší zdroje, bylo potřeba začít zkoumat i parametry vydávaného záření, tyto parametry měřit, upravovat a srovnávat (např. se sluncem nebo vzájemně). Začalo se pracovat se světlem nejen z pohledu kvality osvětlení, ale také se již objevovali myšlenky, zdali vydávané záření nemůže být pro člověka škodlivé. Tyto myšlenky daly vzniknout novému oboru světelné techniky, konkrétně fotobiologické bezpečnosti, která zkoumá vliv světelného záření na člověka, především na jeho oko a kůži. Připouští se i vliv na lidské chování [4].

Na trhu se momentálně vyskytuje široká škála světelných zdrojů pracujících na různých principech. Pro tuto práci nás budou zajímat zdroje osvětlení k domácímu použití. Jedná se především o zdroje s širokým spektrem záření, což dělá celý proces měření a vyhodnocení složitější, než by tomu bylo u homogenních světelných zdrojů (např. laser). Proces měření a vyhodnocení světelných zdrojů z hlediska fotobiologické bezpečnosti se řídí normou, která obsahuje i rozdělení zdrojů podle rizika na základě naměřených výsledků. Cílem této práce je proměřit co možná nejvíce světelných zdrojů pro domácí použití a naměřené (vypočtené) výsledky vyhodnotit podle příslušné normy.

2 ELEKTROMAGNETICKÉ ZÁŘENÍ

Záření, nebo také radiaci, lze definovat jako přenos či šíření energie do prostoru v podobě elektromagnetických vln či hmotných částic. Ve světelné technice sledujeme rozdělení toků energie záření při jejich plynulých přechodech v prostoru. Každé záření můžeme rozložit na složky se sinusovým průběhem, a tyto složky charakterizovat frekvencí či vlnovou délkou. Spektrum záření dostaneme, seřadíme-li jednotlivé složky právě podle frekvence či vlnové délky [1].

2.1 Neionizující záření

Jedná se o záření vlnových délek vyšších než 100 nm, které již není pro lidský organismus takovou zátěží jako záření ionizující, ovšem i z toho typu záření plynou jistá rizika.

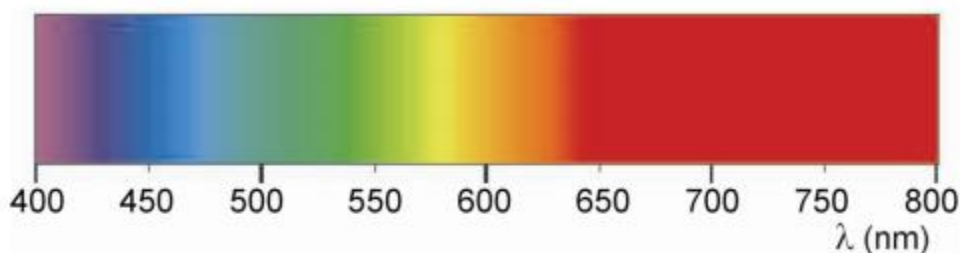
Na trhu dostupné a v praxi běžně používané světelné zdroje vyzařují v oblasti neionizujícího záření, především ve viditelné oblasti (světlo). Částečně však většina zdrojů vyzařuje v různé intenzitě i v oblastech ultrafialového a infračerveného záření.

2.1.1 Světelné záření

Elektromagnetické záření, kterému běžně říkáme světlo, lze popsat frekvencí či vlnovou délkou, a je to takové vlnění, které v našem zrakovém orgánu dokáže vyvolat zrakový vjem a barevný počitek. Slouží jako hlavní prostředek pro přenos informací o okolí pozorovatele, ale má i další vlivy na lidský organismus. Vlnová délka světla, kterou lze okem zachytit, je v rozmezí 380-780 nm [3].

2.1.1.1 Barevné spektrum světla

Světlo se skládá z elektromagnetického záření o různých vlnových délkách, které spadají do různých částí viditelného spektra. Spektrální oblast viditelného záření je rozložena dle barev, kterým odpovídají příslušné meze vlnových délek. Od nejnižších vlnových délek navazuje na ultrafialové záření barva fialová, dále je pak modrá a zelená. Tyto tři barvy jsou chladné, kdežto následující žlutá, oranžová a červená jsou barvami teplými. Vyšší vlnové délky jsou potom již v infračerveném spektru záření, kde oko již ztrácí vjem.



Obr. 2-1 Rozložení barev ve spektrální oblasti viditelného záření [3]

K nejlepší reprezentaci spektrálního složení světla používáme grafy, kdy na vodorovné ose sledujeme vlnovou délku v nanometrech a na svislé ose poměrnou energii. Křivka grafu nám pak popisuje, jak jsou jednotlivé vlnové délky v záření zastoupeny.

Světelné zdroje lze na základě světelného spektra rozdělit. V případě plynulé křivky, zahrnující více barevných spekter, hovoříme o světelných zdrojích se spojitým spektrem. Pokud je křivka spektra nepřerušovaná a barevná pásma záření spolu nesplývají, jedná se zdroje s čárovým

spektrém. Poslední skupinou jsou tzv. monochromatické zdroje, které vyzařují světlo jedné barvy o velmi úzkém rozptylu vlnových délek [3][6].

2.1.2 Ultrafialové záření

Zkráceně nazýváno UV záření je záření o vlnových délkách v rozmezí cca 1-400 nm a podle mezinárodního doporučení CIE se dělí na tři druhy:

- UV-A – rozsah 315 až 400 nm
- UV-B – rozsah 280 až 315 nm
- UV-C – rozsah 100 až 280 nm

Hlavním zdrojem UV záření je slunce, před kterým jsme však chráněni vysokou vrstvou vzduchu v atmosféře. Dalším zdrojem jsou pak umělé světelné zdroje, převážně rtuťové výbojky, které jsou konstruovány s baňkou z běžného či olovnatého skla, které UV záření nepropouští. Ochrana se před UV zářením je důležitá, neboť vystavení se vysoké dávce ozáření může způsobit vážné zdravotní potíže (např. rakovina kůže).

UV záření různých vlnových délek však nachází i mnoho uplatnění. Záření s vlnovou délkou 366 nm má fotochemické účinky, urychluje chemické reakce a používá se například při chemických rozborech, fotoanalýze, ionizaci plynů nebo v polygrafii. Fluorescenční analýza užívá záření o vlnových délkách 365 a 254 nm. Další použití UV záření pro léčbu různých onemocnění, jelikož záření o vlnové délce 283 podporuje tvorbu vitamínu D, nebo vlnové délky 365, 311 a 254 nm pomáhají při tuberkulóze, zánětu dutin a při dalších onemocněních [1].

2.1.3 Infračervené záření

Jedná se o elektromagnetické záření s vlnovou délkou cca od 780 nm až do 1 mm. Rovněž se užívá pro toto záření zkratka, a to sice IR, a také se dělí podle CIE na tři druhy:

- IR-A – rozsah 780 až 1400 nm
- IR-B – rozsah 1400 až 3000 nm
- IR-C – rozsah 3000 až 10^6 nm

Infračervené záření má tepelné účinky a jejich zdrojem je tak prakticky každé zahřáté těleso. Jeho paprsky se snadno šíří a prostupují vzduchem a dalšími prostředím. K omezení šíření je možné použít tepelné izolanty, jako například sklo. Špatně se šíří také vodou.

IR záření se využívá především k vytápění, jelikož jeho paprsky sálají teplo. V lékařství se uplatňují pro vyhřívání orgánů, tzv. diathermii, kde se používá vlnových délek v rozsahu 800-900 nm. V technice se využívá infrafotoografie, kde se infračervené paprsky převádí na viditelné světlo (např. infrakamera, infradalekohled) [1].

3 ZRAK A VIDĚNÍ

Pro návrh jakéhokoliv osvětlení je důležité znát základy anatomie zraku, procesu vidění a celého mechanismu vzniku zrakového počítku a vjemu. Zrakové ústrojí poskytuje příjem a zpracování informací přenášených světlem, které nám v mozku prostřednictvím počítků zprostředkovávají informaci o pozorovaném prostředí.

Umělé osvětlování nám napomáhá k příjmu informací v prostorech nebo čase, kdy denní světlo nestačí. V některých případech může nevhodné umělé osvětlení naopak znesnadnit příjem informací, nebo dokonce ohrozit lidský organismus poškozením zrakového ústrojí [1].

3.1 Zrakové ústrojí

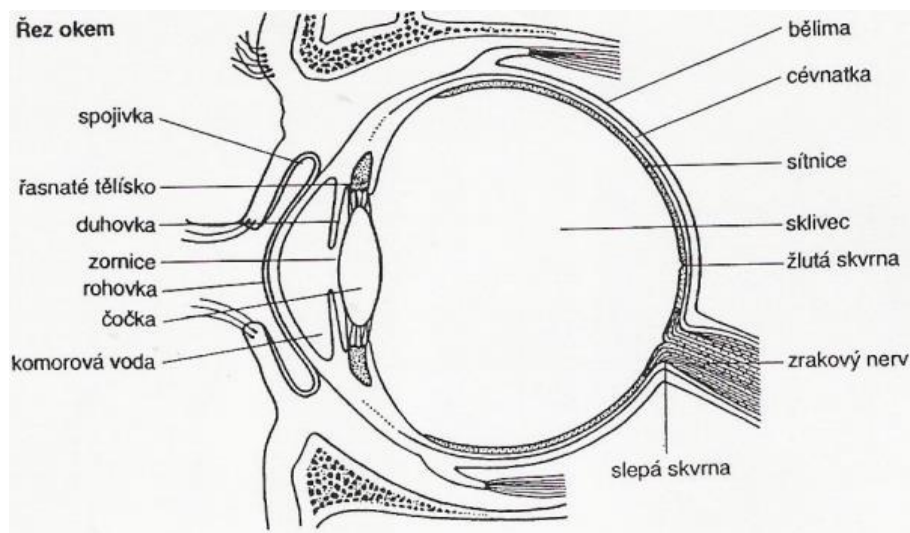
Zrakové ústrojí je tvořeno souborem orgánů zajišťujících příjem informace ze světelného podnětu, její zpracování a přenos v podobě nervových podráždění, jejichž výsledkem je zrakový vjem. Zrakové ústrojí člověka má tři hlavní části:

- periferní (oko)
- spojovací (zrakové nervy)
- centrální (podkorové a korové části mozku)

Orgánem, který zprostředkovává příjem informace o vnějším prostředí přenášené světlem je oko. Oko danou informaci dále přeměňuje na nervová podráždění a částečně ji i zpracovává. Oko je uloženo v tzv. očníci. Jeho tvar je přibližně kulový, což umožňuje rychlé otáčení v očníci. Tvoří ho několik částí plnící různé funkce, které můžete vidět na Obr. 3-1, ovšem oko se především rozděluje na dvě soustavy - optickou a nervovou. Optická soustava, která zahrnuje rohovku, přední komoru, duhovku se zorníčkou, čočku a sklivec, zprostředkovává převrácený, zmenšený a neskutečný obraz vnějšího světa, který se tvoří na sítnici. Nervovou soustavu tvoří především nervové zásobení a sítnice, což je tenká průsvitná blána se specifickou buněčnou skladbou. Sítnice přijímá zrakovou informaci a mění ji do podoby, kterou je schopno zpracovat ve vyšších úrovních zrakového systému a částečně filtruje užitečné informace. Zraková dráha obsahuje čtyři úrovně nervových buněk, schopných přijímat a přenášet určitá podráždění a signály:

- Fotoreceptory (buňky citlivé na světlo) – čípky, tyčinky, cirkadiánní receptory
- Bipolární buňky
- Gangliové buňky
- Těla nervových buněk, vysílajících své neurity z podkorových jader mozku do mozkové kůry

Vnímání barvy světla je podle teorie způsobeno třemi druhy receptorů obsažených v oku, které jsou různě citlivé na základní barvu. Podráždění jednoho druhu vyvolá vjem červené barvy, druhého zelené barvy a třetího modré barvy. Tato teorie se nazývá Young-Helmholtzova trojkomponentní teorie [1][6].

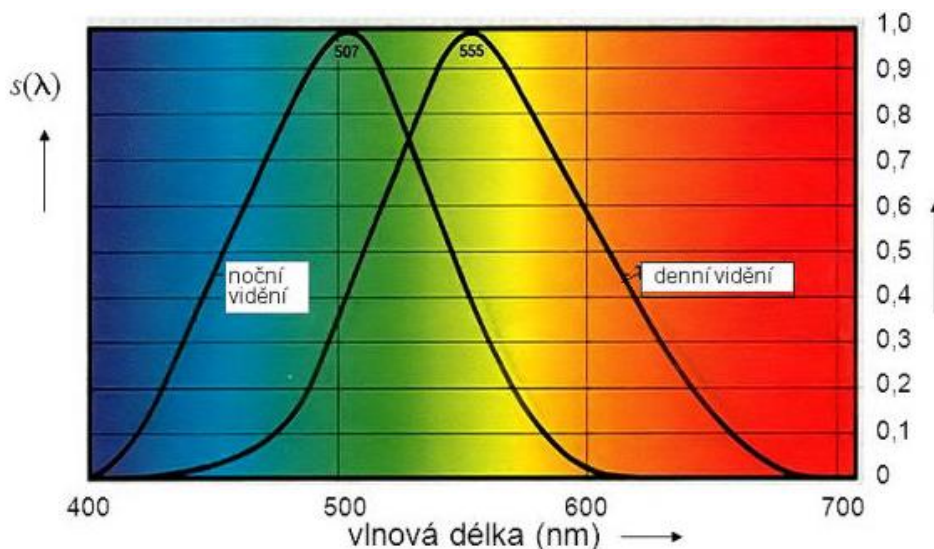


Obr. 3-1 Řez okem [11]

3.2 Spektrální citlivost zraku

Zrakový orgán má různou citlivost na záření různých vlnových délek. U každého člověka je průběh závislosti a hranice viditelnosti jiný, může být ovlivněn životním prostředím, roční dobou, věkem ad. Podle intenzity osvětlení prostoru, ve kterém probíhá zrakový vjem, můžeme rozdělit vidění na fotopické a skotopické. Největší citlivost při dobrém osvětlení, a tedy fotopickém vidění určuje především citlivost čípků a pohybuje se okolo 555 nm. Čípky jsou prvními neurony sítnice a jsou citlivé na barvy. Při horších podmínkách osvětlení (šero, tma), a tedy u skotopického vidění je největší citlivost na vlnové délky okolo 513 nm, kdy se uplatňují neurony zvané tyčinky, které nejsou schopny rozeznávat barvy. Obvykle se citlivost udává v poměrných hodnotách vztažených k maximální absolutní hodnotě citlivosti. Spektrální citlivost oka je také výrazně závislá na adaptačním jasu, neboť při oslnění dochází ke snížení rozeznatelnosti barev, což se děje rovněž při nedostatečné intenzitě osvětlení, kdy při přechodu na skotopické vidění je pozorovatel již barvoslepý.

Mezinárodní komise pro osvětlení stanovila dohodu o hodnotách normálního fotometrického pozorovatele, aby byla zachována jednotnost světelně technických výpočtů [1].



Obr. 3-2 Poměrná spektrální citlivost zraku normálního fotometrického pozorovatele [12]

4 SVĚTELNÉ ZDROJE PRO VŠEOBECNÉ OSVĚTLENÍ

Světelným zdrojem nazýváme takové zařízení, které generuje a vysílá viditelné optické záření. Z umělých zdrojů světla mají největší význam zdroje napájené elektrickou energií. U světelných zdrojů, které přeměňují elektrickou energii na světlo, rozdělujeme tyto zdroje podle principu, kterým dané přeměny dosáhnou, na celkem tři typy zdrojů:

- 1) Teplotní zdroje - látka zahřátá průchodem elektrického proudu vysílá viditelné optické záření,
- 2) Výbojové zdroje - vybuzení atomů plynu nebo par kovů v elektrickém a magnetickém poli,
- 3) Luminiscenční zdroje - luminiscence pevných látek [4].



Obr. 4-1 Rozdělení elektrických světelných zdrojů [7]

4.1 Základní parametry světelných zdrojů

Vlastnosti světelných zdrojů jsou důležitým faktorem při rozhodování, který světelný zdroj je vhodný pro různé typy použití. Mimo základních parametrů zmíněných níže, rozeznáváme mnoho dalších vlastností, jako například spektrální složení vyzařovaného světla, druh patice zdroje, provozní poloha, napětí či teplota ad.

Světelný tok Φ - jednotka lumen (lm)

Světelný tok udává množství světla vyzařovaného světelným zdrojem za jednotku času. Závisí na typu světelného zdroje a jeho hodnotu můžeme zjistit na obalu, či v katalogu daného světelného zdroje stejně jako následující parametry.

Teplota chromatičnosti T_{cp} - jednotka Kelvin (K)

Používá se k popisu barevných vlastností vyzařovaného světla. V případě teplotních zdrojů odpovídá teplotě vlákna, u výbojových zdrojů užíváme výraz náhradní teplota chromatičnosti. Dle teploty chromatičnosti dělíme barvu světla vyzařovaného světelným zdrojem na 3 kategorie, a tedy teple bílou < 3300 K, bílou 3300-5000 K a denní > 5000 K.

Index podání barev R_a (-)

Zdroje se stejnou teplotou chromatičnosti mohou mít rozdílné podání barev v závislosti na spektrálním složení vyzařovaného světla. Schopnost vnímat barvy při daném spektru světelného zdroje nám proto popisuje index podání barev. Čím vyšší je index, tím lepší podání barev daný zdroj vykazuje. Maximální hodnota je 100.

Životnost - jednotka hodina (h)

Tuto vlastnost lze vnímat dvěma způsoby, a to sice jako fyzickou životnost, která představuje dobu svícení až do úplné ztráty provozuschopnosti. Nebo častěji sledovanou užitečnou životnost, což je doba, po kterou jsou parametry zdroje v požadovaných mezích.

Měrný výkon η - ($\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$)

Vyjadřuje míru přeměny elektrické energie na světelnou, a tím pádem definuje vztah mezi vyzařovaným světelným tokem a příkonem světelného zdroje, který odebírá ze zdroje elektrického. Logicky je tento parametr důležitý pro posouzení ekonomičnosti zdroje [3].

4.2 Světelné zdroje pro domácnosti

Ze světelných zdrojů, které se dnes běžně používají pro všeobecné osvětlování, se v domácnostech můžeme setkat především se třemi typy, což zúží naše měření na žárovky, kompaktní a lineární zářivky, a také na stále oblíbenější světelné zdroje LED.

4.2.1 Teplotní zdroje

Jedná se o nejstarší skupinu elektrických světelných zdrojů, jejichž princip vyzařování světla je založen na jevu inkandescence, tedy tepelném vybuzení látky, kdy povrch zahřáté látky vysílá do okolí elektromagnetické záření, jehož složkou je i viditelné světlo. Látka zahřátá průchodem elektrického proudu vysílá do okolí optické záření se spojitým spektrem. Teplotní zdroje se vyznačují velmi malou účinností přeměny elektrické energie na světelnou, naproti tomu mají nejlepší index podání barev, díky čemuž jsou na trhu stále oblíbeným zdrojem osvětlení. Jejich použití je vhodné v prostorech, kde jsou vysoké požadavky na věrnost barev nebo tam, kde je třeba okamžitý náběh na 100 % světelného toku. Hlavními představiteli této skupiny jsou žárovky - klasická a halogenová [3][7].

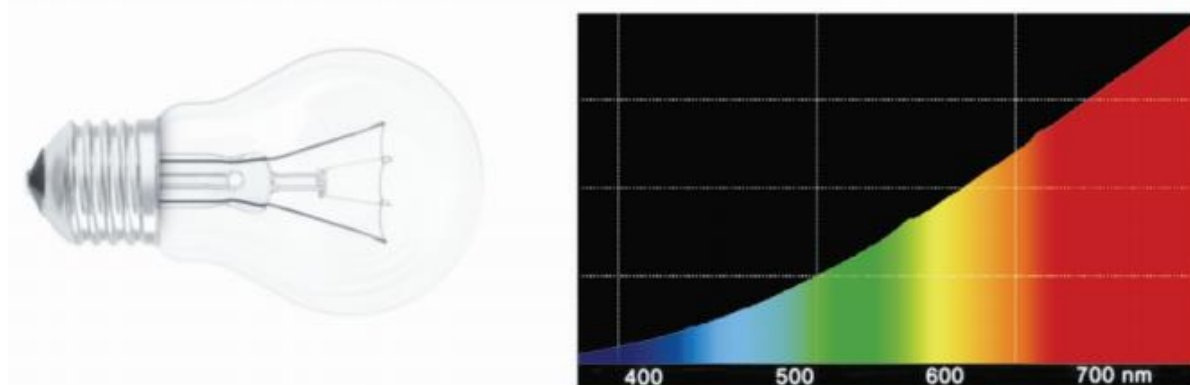
4.2.1.1 Klasická žárovka

Stále patří k nejoblíbenějším světelným zdrojům na trhu. Princip funkce žárovky spočívá v protékání proudu odporovým vláknem, které je uzavřeno do skleněné baňky, odkud je odčerpán vzduch. Vláknem se vlivem tepelných ztrát zahřívá a stává se zdrojem záření. Moderní žárovky

používají wolframová vlákna ve tvaru spirály a jsou buď vakuové, či plněné inertními plyny pro zamezení hoření vlákna.

Žárovky mají řadu kladných vlastností, mezi které patří především nízká cena, jednoduchost konstrukce, výborné podání barev (index $R_a = 100$), ekologičnost a mnoho dalších, které naopak sráží malý měrný výkon způsobený tím, že většina elektrické energie je přeměněna na teplo a jen malé množství vyzařené energie se pohybuje ve viditelné oblasti. Další nevýhodou je malá životnost pohybující se okolo 1000 h a také závislost parametrů na napájení a teplotě vlákna.

Klasické žárovky nachází uplatnění v domácnostech, ale i průmyslových objektech, kde díky svému podání barev zabráňují vzniku stroboskopického efektu u točivých strojů [3][4].



Obr. 4-2 Žárovka a příklad jejího spektra [3]

4.2.1.2 Halogenová žárovka

V podstatě zdokonalená klasická žárovka, zdokonalena zavedením halogenového regeneračního cyklu. Sloučeniny halogenových prvků pomáhají navracet odpařený wolfram z vlákna zpět, ovšem ne kompletně, proto se vlákno časem přepálí jako u klasických žárovek. Nicméně je tento regenerační cyklus velmi účinný a měrný výkon i světelný tok je u halogenových žárovek cca o 100 % vyšší než u klasických žárovek, což je způsobeno vyšší odolností vlákna vysokým teplotám, které jsou značně vyšší. Současně je zdvojnásobena i životnost těchto žárovek, oproti klasickým. Vysoké teploty ovšem vylučují použití klasického skla pro konstrukci baňky. Využívá se tedy sklo křemičité, které s sebou nese dvě nevýhody. Tou první je, že se na baňku nesmí sahat, kvůli soli obsažené v potu, která při vysoké teplotě reaguje se sklem, a to snadněji praskne. Tím druhým neduhem, je propustnost UV záření, čemuž se zamezuje přidáním oxidu titaničitého, či ceričitého do baňky. Jelikož se na skle baňky neusazuje takové množství odpařeného wolframu, jako u klasických žárovek, uchovávají si halogenové žárovky vysoký světelný tok po celou dobu životnosti. U moderních halogenových žárovek se užívá selektivního filtru na baňkách, který vrací část infračerveného záření na vlákno a zvyšuje tak měrný výkon. Další možností zvýšení účinnosti je dávkování žárovek xenonem.

Rovněž jako klasická žárovka, je halogenových žárovek užito pro všeobecné osvětlování. Vysoký světelný tok dělá halogenové žárovky vhodné pro použití v oblasti přesného směřování paprsků, velká část dopravních prostředků proto dnes využívá právě tento světelný zdroj ve svých světlometech [1][3][5].

4.2.2 Výbojové zdroje

Základem těchto světelných zdrojů je průchod elektrického proudu prostředím, které obsahuje vhodné páry a plyny. Elektrickým proudem se vybudí atomy těchto směsí a přejdou do vyššího energetického pásma. Při návratu vybuděných atomů zpět do svého stabilního stavu se uvolní energie ve formě fotonu a vzniká tak optické záření. K vybudění atomu je potřeba tzv. ionizační napětí, které se liší podle použitých par či plynů. U každého atomu jsou po přechodu emitovány fotony s různou energií a vlnovou délkou, proto je spektrum výbojových světelných zdrojů čárové, nikoliv spojitě, jako u teplotních zdrojů. Na rozdíl od žárovky neobsahuje všechny barvy viditelného spektra, a světlo proto není tak přirozené. Těleso výbojky bývá zkonstruováno ze skla, korundu a dalších materiálů, je uzavřeno v baňce, která bývá obvykle vnitřní strany pokryta luminoforem, který hraje u výbojových zdrojů důležitou roli. Základní rozdělení výbojek na základě tlaku plynové náplně dělí výbojové světelné zdroje na nízkotlaké a vysokotlaké, přičemž k osvětlení domácnosti se používají hlavně nízkotlaké rtuťové výbojky - zářivky. K nízkotlakým výbojkám řadíme ještě indukční výbojky, které jsou rovněž plněny parami rtuti, ovšem liší se v principu zapálení výboje. Tlak plynové náplně bývá cca 0,5-1 Pa [1][3][7].

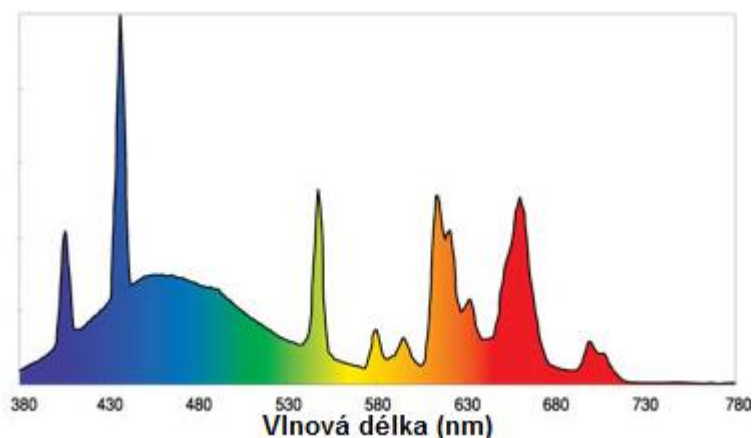
4.2.2.1 Nízkotlaké rtuťové zdroje

Lidově rozšířenější název "zářivka" představuje světelný zdroj, který vlastním výbojem v parách rtuti, vyzařuje především v oblasti ultrafialového záření, a proto využívají luminoforu pro transformaci na viditelné světlo. Spektrum vyzařovaného světla je ovlivněno použitým luminoforem, kterým je pokryta vnitřní strana zářivkové trubice.

Zářivky jsou k dostání především ve tvaru trubice o různých průměrech, podle typu zářivky. Tyto zářivky se nazývají lineární a z každé strany trubice mají žhavicí elektrody zhotovené z wolframu. Dále jako všechny výbojky, musí obsahovat předřadník k zapálení výboje. Dalším typem zářivek, které jsou dnes velmi populární, jsou kompaktní zářivky. Ty jsou k dostání v mnoha tvarech a provedeních. Používají elektronický, integrovaný předřadník a liší se od běžných zářivek již zmíněným tvarem, ale i parametry a kvalitou.

Velkou výhodou zářivek oproti žárovkám je doba životnosti, která dosahuje u typu s klasickým předřadníkem cca 10 tis. hodin. U zářivek s elektronickým předřadníkem je to hodnota okolo 18 tis. hodin. Na životnost zářivky má velký vliv počet zapnutí, a proto se nehodí k osvětlování prostor, kde dochází k častému zapínání a vypínání. Toto souvisí i se skutečností, že světelný tok zářivek se ustálí na jmenovité hodnotě až po cca 3 minutách chodu. Horší podání barev kompenzuje výrazně lepší měrný výkon ve srovnání s žárovkami.

Své využití nacházejí zářivky především v osvětlení vnitřních prostor, jelikož jsou teplotně závislé. Lineární zářivky můžeme často vidět využívané k osvětlení prostor na pracovištích nebo ve školách, kde je potřeba osvětlit větší prostor. Kompaktní zářivky nacházejí uplatnění v domácnostech a z velké části dnes nahrazují klasické žárovky [1][3][5].



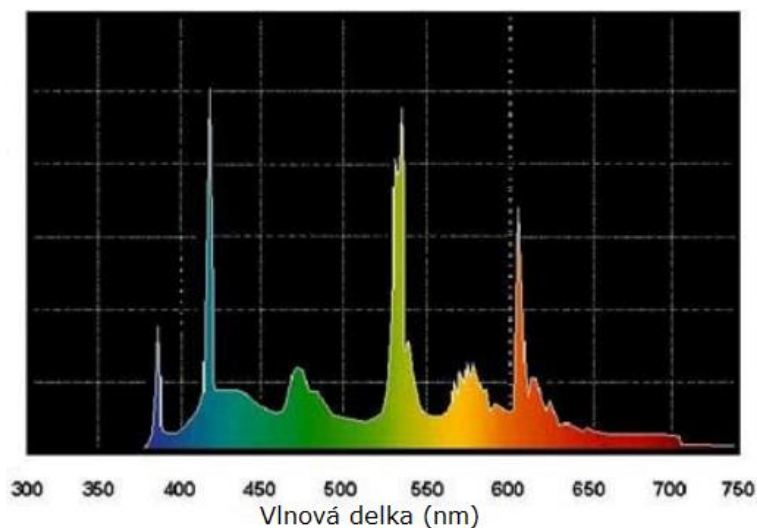
Obr. 4-3 Příklad barevného spektra zářivky [19]

4.2.2.2 Indukční výbojky

Podobně jako zářivky fungují na bázi rtuti, ovšem k zapálení a hoření výboje nepoužívají elektrody, nýbrž vysokofrekvenční elektromagnetické pole, které je vybuzeáno cívkou nebo více cívkami. Tento bezelektrodový princip je stále předmětem vývoje a hlavními představiteli tohoto typu výbojek jsou Philips QL a Osram ENDURA.

Omezením opalování elektrod se indukční výbojky dožívají až 60 tis. hodin, dalšími výhodami jsou rychlý náběh světelného toku, dobré podání barev a vysoký měrný výkon.

Uplatnění nachází indukční výbojky ve venkovním osvětlování, ale i v osvětlování velkých, vnitřních prostor, kde je výměna světelných zdrojů náročná. Konkrétně se indukční výbojky využívají v osvětlení tunelů, mostů, prům. hal, ale nachází uplatnění i v domovech [3][4].



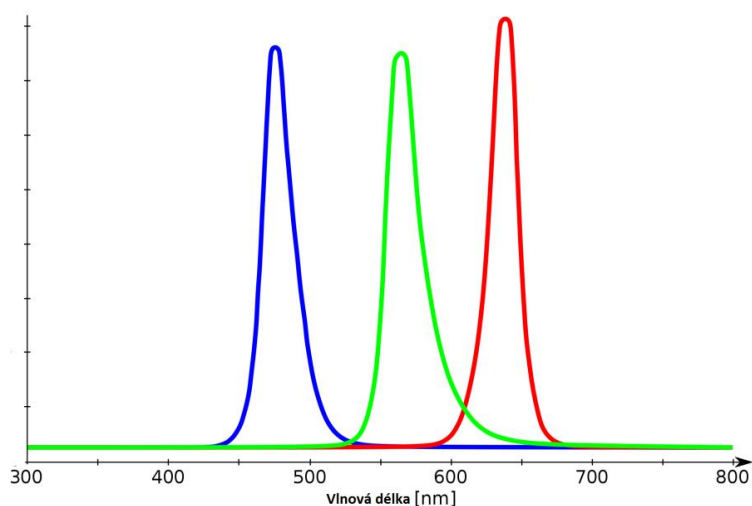
Obr. 4-4 Příklad spektra indukční výbojky [18]

4.2.3 Polovodičové zdroje LED

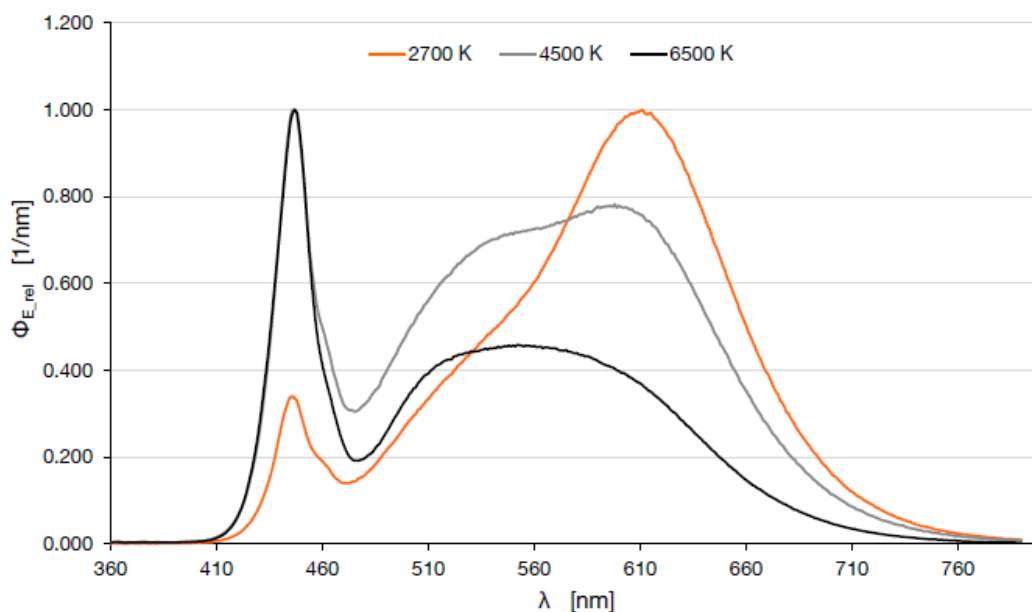
LED neboli světlo emitující diody, jsou momentálně nejperspektivnějším světelným zdrojem šířícím se do všech oblastí světelné techniky a osvětlování. Hlavní příčinou je neustále rostoucí měrný výkon těchto zdrojů. Světelné diody fungují na principu generování fotonů, při průchodu elektrického proudu polovodičovým přechodem. Přiložením stejnosměrného napětí správné polaritě na přechod začne docházet k rekombinaci elektronů a děr, při které se vyzáří kvantum energie ve formě fotonu. Jde tedy o úplně jiný princip než u teplotních a výbojových zdrojů.

Vyzářené spektrum je velmi úzké - monochromatické, a proto se v jednom pouzdru kombinují tři čipy vhodných barev. Nejvhodnější je kombinovat červenou, zelenou a modrou diodu, tzv. RGB model. První diody vyzařovaly pouze červené světlo, poté se přidaly diody dalších barev, ale až s příchodem modré diody bylo možné skládat bílé světlo, což otevřelo LED světelným zdrojům dveře do oblasti všeobecného osvětlování. Další možností záření bílého světla diodou, je nanesení tzv. konvertoru, který podobně jako luminofor převede část záření na jiné vlnové délky. Jako konvertor se používá aktivních hmot na bázi fosforu.

Výhody LED světelných zdrojů ve srovnání s žárovkami a výbojkami jsou evidentní při použití v praxi. Jejich rozměry jsou podstatně menší, stejně jako napájecí napětí. Naproti tomu mají vysoký měrný výkon, index podání barev a životnost v řádu desítek tisíc hodin. Nevýhodou je jejich tepelná závislost a vyšší pořizovací cena, nicméně LED světelné zdroje jsou budoucností světelné techniky. Mimo využití LED s bílou barvou pro osvětlování prostor (např. domácností), jsou diody používány jako indikační a signalizační (např. u počítačů, automobilů ad.) nebo jako dekorativní osvětlení [3][5][7].



Obr. 4-5 Složení bílého světla z RGB LED [10]



Obr. 4-6 Typická spektra bílých LED [16]

5 ZÁKLADNÍ FOTOMETRICKÉ A RADIOMETRICKÉ VELIČINY

Tab. 5-1 Přehled základních fotometrických a radiometrických veličin [9]

Fotometrická veličina	Symbol	Jednotka	Radiometrická veličina	Symbol	Jednotka
Svítivost	I	cd	Zářivost	I_e	$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$
Světelný tok	Φ	lm	Zářivý tok	Φ_e	W
Osvětlení	E	lx	Intenzita ozáření	E_e	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
Jas	L	$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$	zář	L_e	$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$

Prostorový úhel Ω - jednotka steradián (sr)

Je důležitou veličinou pro výpočty ve světelné technice a představuje prostor vymezený kuželovou plochou, jenž na kouli o poloměru r , vytvoří plochu A . Vrchol kužele je pak ve středu koule a velikost prostorového úhlu, pod kterým lze z vrcholu vidět plochu A se vyjádří jako podíl plochy A a kvadrátu poloměru dané koule.

5.1 Fotometrické veličiny

Jsou vztaženy pouze k viditelné části elektromagnetického záření a jsou definovány spektrální citlivostí oka. Kvantitativně hodnotí světelné záření na základě velikosti možného vjemu lidským okem.

Svítivost I podává informaci o hustotě světelného toku v prostoru v různých směrech. Pracuje pouze s bodovým zdrojem světla a vyjadřuje jeho schopnost vyvolat zrakový vjem v daném směru.

Světelný tok Φ vyjadřuje množství světelné energie, kterou zdroj vyzáří nebo záření přenese za jednotku času určitou plochou. Představuje tok zdroje o svítivosti I do prostorového úhlu Ω a udává schopnost zářivého toku vyvolat zrakový vjem.

Osvětlení E je světelný výkon dopadající na plochu a udává plošnou hustotu světelného toku. Určí se jako podíl světelného toku a obsahu plochy, na kterou dopadá.

Jas L se používá pro plošné zdroje a je určen podílem svítivosti elementární plošky zdroje ve zvoleném směru a kolmého průměru plošky v tomto směru.

5.2 Radiometrické veličiny

Popisují přenos energie zářením a vztahují se na veškeré elektromagnetické záření, tedy nejen na záření, které lze vnímat lidským okem.

Zářivost I_e je schopnost bodového zdroje vyzařovat ve sledovaném směru a určí se jako podíl elementárního zářivého toku a prostorového úhlu, ve kterém je tok vyzařován.

Zářivý tok Φ_e udává výkon zářivé energie za jednotku času procházející určitou plochou. Bývá vztažen na velmi krátký časový interval.

Intenzita ozáření E_e vyjadřuje výkon dopadající na plochu a udává plošnou hustotu zářivého toku.

Zář L_e se určí podílem zářivosti elementární plošky zdroje ve zvoleném směru a kolmého průměru plošky v tomto směru [2][3][9].

6 FOTOBIOLOGICKÁ BEZPEČNOST

Fotobiologická bezpečnost světelných zdrojů a soustav světelných zdrojů je téma, kterým se zabývá mezinárodní norma EN 62471:2008, a pro tuto práci je použita její česká verze ČSN EN 62471. Tato norma nám poskytuje kritéria k posouzení světelných zdrojů, soustav světelných zdrojů a svítidel z hlediska bezpečnosti pro živou tkáň. Stanovuje meze ozáření, měřicí metody a přístroje, a také klasifikaci zdrojů podle rizika všech el. energií napájených nekoherentních širokospektrálních zdrojů optického záření v rozsahu vlnových délek od 200 do 3000 nm [8].

Díky některým problémům s aplikací normy IEC EN 62471, a k osvobození výrobců od zbytečných měření se zavádí nový přístup k hodnocení fotobiologické bezpečnosti světelných zdrojů vyzařujících ve viditelné oblasti. Norma EN 62471 totiž nezohledňuje realistický scénář expozice, u většiny zdrojů je výsledkem "bezpečný" atd. Dále norma zahrnuje šest druhů nebezpečí pro oko a kůži v rozsahu 200-3000 nm. Vzhledem k tomu že většina zdrojů nepokryje celý tento rozsah a vyzařuje jen v určité oblasti vlnových délek, přichází v úvahu rozdělení testování světelných zdrojů podle typu zdroje. Např. výbojky by byly testovány na nebezpečí z ozáření UV zářením, LED a výbojky včetně zářivek by byly testovány na nebezpečí ozáření modrým světlem a např. halogenové žárovky na nebezpečí ozáření oka IR zářením. Jako vodítko k posouzení zdrojů vyzařujících především v oblasti 380-780 nm na nebezpečí ozáření sítnice modrým světlem byl sepsán dokument IEC TR 62778, který upravuje původní přístup [17][20].

6.1 Fotobiologické účinky světelného záření na lidský organismus

Světelné záření má vliv na řadu procesů, které probíhají v lidském těle. Tyto opakující se procesy, které nazýváme biorytmy, neprobíhají stejnou rychlostí, ani ve stejné době. Světlo má největší vliv na tzv. cirkadiánní rytmy, při kterých dochází k tvorbě hormonu melatoninu [3].

6.1.1 Cirkadiánní rytmy

Jedná se o jednodenní rytmus, který reaguje na střídání dne a noci. Mozek v tomto rytmu uzpůsobuje organismus na zátěž v průběhu dne. Tento jev se nazývá také cirkadiánní hodiny, podle kterých organismus řídí, kdy je čas k vykonávání produktivní práce, nebo naopak, kdy je čas k odpočinku.

Tento rytmus závisí na vylučování hormonu melatoninu, který se tvoří především za tmy a bývá proto označován, jako spánkový hormon. Zdali je právě tma či světlo, se mozek dozví za pomoci gangliových buněk, které se nachází na sítnici oka. Melanopsin, který tyto buňky obsahují, funguje jako detektor světla různých spekter. Buňky zaznamenají rovněž dobu trvání osvětlení a předají tuto informaci do mozku. V případě, že se setmí, dostane šišinka (epifýza) signál, začne produkovat melatonin a připravovat tělo ke spánku. Ráno pak proběhne tento děj opačně.

Průběh cirkadiánního rytmu fyziologických procesů u zdravého člověka:

- 2:00 – nejhlubší spánek
- 6:00 – nejnižší tělesná teplota
- 8:00 – končí sekrece melatoninu
- 13:00 – největší bdělost
- 17:00 – největší svalová síla a nejvyšší kardiovaskulární činnost
- 22:00 – nejvyšší tělesná teplota
- 22:30 – potlačení pohybu střev

K desynchronismu cirkadiánních, neboli biologických hodin, může dojít vlivem několika skutečností. Např. cestování přes několik časových pásem, kdy organismus potřebuje několik dní, aby se přizpůsobil změně. Vlivem výrazné změny časového pásma může docházet k časté únavě, nespavosti, depresím ad. Další nebezpečný faktor je práce přes noc, kdy lidé nedávají organismu čas na tvorbu melatoninu a riskují spánkové nebo trávící poruchy. Naopak v zimních měsících při nedostatečném pobytu na světle může docházet k deficitu denního světla, který se projeví častou únavou a sníženou aktivitou. Deficit je možné léčit působením umělého osvětlení s vysokou osvětleností po určitou dobu [1][3].

6.1.2 Nebezpečí modrého světla

Se stále se rozšiřujícím záběrem LED světelných zdrojů, které jsou díky svým vlastnostem hojně využívány k osvětlení prostor, rostou také obavy týkající se nebezpečí modrého světla. Jedná se především o nebezpečí vedoucí k narušení cirkadiánních rytmů a nebezpečí poškození sítnice, které bývá ve většině případů nevratné [13].

6.1.2.1 Vliv modrého světla na cirkadiánní rytmy

Vystavení organismu světelnému záření potlačuje produkci melatoninu, což vede k vyšší bdělosti, soustředěnosti ad. Výzkum prokázal, že záření o vlnových délkách modrého světla (400-500 nm) potlačuje tvorbu melatoninu až dvakrát více než záření jiných vlnových délek.

V době, kdy má tělo odpočívat a čerpat energii je tedy vhodné nevystavovat se především modrému světlu (spát při vypnuté televizi, nedívat se před uložením ke spánku do displeje různých zařízení ad.). Naopak v případě, kdy je třeba vysoké produktivity, je modrá složka ve světle vítána. Pro osvětlení pracovišť je tak nesnadné navrhnout osvětlení, které zajistí dobré světelné podmínky pro práci, a současně nenaruší biologické rytmy pracovníků na odpoledních či nočních směnách.

Za účelem ochrany těchto pracovníků před riziky plynoucích z ozáření modrým světlem byl proveden výzkum, který nejprve zkoumal, zdali dojde ke zvýšení tvorby melatoninu při použití brýlí s filtrem, jenž nepropouští vlnové délky nižší než 530 nm. Dalším způsobem bylo výrazné snížení intenzity osvětlení zdrojů. Z pokusu vyplynulo, že obě metody vykazovaly přibližně stejný růst tvorby melatoninu, který by částečně omezil rozhození cirkadiánních rytmů [14][15].

6.1.2.2 Vliv modrého světla na sítnici

V sedmdesátých letech bylo zjištěno, že fotochemické poškození sítnice z ozáření modrým světlem se může vyskytnout za specifických podmínek expozice, které by mohlo nastat i u komerčně dostupných světelných zdrojů.

Poškození sítnice modrým světlem je způsobeno poruchou fotochemické synergie mezi pigmentovým epitelem a fotoreceptory (tyčinky a čípky). Pigmentový epitel má několik základních funkcí pro udržení citlivosti fotoreceptorů na světlo, včetně regenerace fotopigmentu. Následek nebezpečí modrého světla má podobu diskrétní, depigmentované léze (bledé skvrny) viditelné v pigmentovém epitelu asi 48 hodin po koncentrovaném vystavení záření vlnových délek odpovídajících modrému světlu. Funkčně tato léze způsobuje skotom (výpadek v zorném poli) na sítnici, který může, nebo nemusí být vratný v rámci několika měsíců v závislosti na intenzitě a době trvání ozáření [13].

6.2 Negativní fotobiologické účinky UV, viditelného a IR záření na zrakové ústrojí a kůži

Mimo fotobiologických účinků neionizujícího elektromagnetického záření na vnitřní procesy lidského organismu, které jsou z velké části vratné a léčitelné, je hlavním nebezpečím pro člověka z důsledku ozáření poškození zrakového ústrojí nebo pokožky.

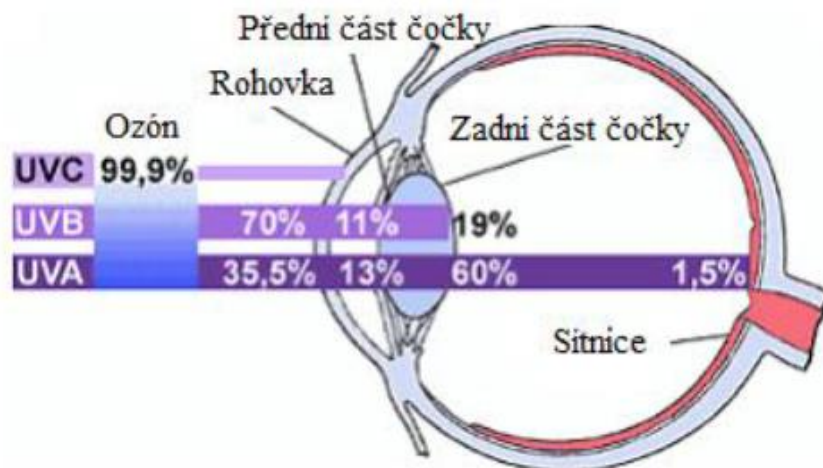
Negativní účinky záření jednotlivých vlnových délek:

Tab. 6-1 Přehled možných negativních účinků záření na lidský organismus [6]

Vlnová délka [nm]	Oblast	Účinek na oko	Účinek na kůži
100 – 280	UVC	Fotokeratitida Konjunktivitida	Erytém Oslabení imunitního systému Rakovina kůže
280 – 315	UVB	Fotokeratitida Konjunktivitida Katarakta	Erytém Oslabení imunitního systému Rakovina kůže Aktinická elastóza
315 – 400	UVA	Fotokeratitida Konjunktivitida Katarakta Fotorenitida Aktinická retinopatie	Erytém Oslabení imunitního systému Rakovina kůže Aktinická elastóza Opálení kůže
380 – 780	Viditelná	Fotorenitida Aktinická retinopatie Oslnění	Spálení kůže Fotodermatóza
780 – 1400	IRA	Katarakta Popálení sítnice	Spálení kůže
1400 – 3000	IRB	Katarakta Popálení rohovky	Spálení kůže
3000 – 10 ⁶	IRC	Katarakta Popálení rohovky	Spálení kůže

6.2.1 Negativní účinky UV záření

Důležitými faktory při ozáření UV zářením jsou především vlnová délka záření, energie fotonů, intenzita záře, doba ozáření ad. O hloubce průniku UV záření rozhoduje vlnová délka, která s hloubkou průniku roste. Nejvyšší pronikavost má záření spadající do oblasti UVA, dále UVB a nejmenší průnik způsobuje záření z oblasti UVC [6].



Obr. 6-1 Propustnost UV záření okem [6]

6.2.1.1 Fotokeratitida

Fotokeratitidu způsobuje nadměrné záření o vlnových délkách 200 až 400 nm, přičemž nejrizikovější je oblast 200 až 320 nm. Mezi projevy patří silná bolest, světloplachost, patologický nález na spojivkách a rohovce. I přes pocit podobný písku v oku je důležité nechat oko v klidu a nepoškodit tak rohovku ještě více. Léčba je krátkodobá a spočívá v podání anestetik, případně cykloplegik a lokálních antibiotik. Důležitý je odpočinek pro oko v prostředí bez intenzivního osvětlení [8].

6.2.1.2 Ultrafialový erytém

Nadměrné ozáření UV zářením o stejných vlnových délkách jako u fotokeratitidy, přičemž nejvíce nebezpečné jsou vlnové délky 254 až 295 nm, může způsobit ultrafialový erytém neboli akutní zápal kůže. Ten se s odstupem několika hodin projevuje bolestí a svěděním kůže, na které se mohou objevit puchýřky, opuchnutí či zčervenání. Erytém může doprovázet i horečka. Náhylnější je pokožka bez pigmentace, jelikož pigment chrání kůži před paprsky UVA a UVB. K návratu kůže do normálního stavu dochází po cca 2 týdnech, během kterých je možné lokálně mazat postižené místo [8].

6.2.1.3 Zákal způsobený UV zářením

Lidově známý šedý zákal je onemocnění postihující oční čočku. Zakalená čočka má omezený proud světla, který do ní vstupuje, a tedy sníženou celkovou informaci, které je oko schopné ze světla přijmout. Nejvyšší nebezpečí představuje oblast záření UVB, konkrétně vlnové délky 290 až 320 nm. Šedý zákal může vzniknout nadměrným ozářením speciálními světelnými zdroji, ale i ozářením ze slunce. Léčbou je operace, kdy dochází k nahrazení poškozené čočky, čočkou umělou [8].

6.2.2 Negativní účinky světelného záření

Stejně jako u UV oblasti, záleží na parametrech záření. V oblasti spektra viditelného světla představuje největší hrozbu tzv. modré světlo, které pokrývá vlnové délky 430-500 nm a má vysokou energii blízkou se energii UV záření.

6.2.2.1 Fotoretinitida

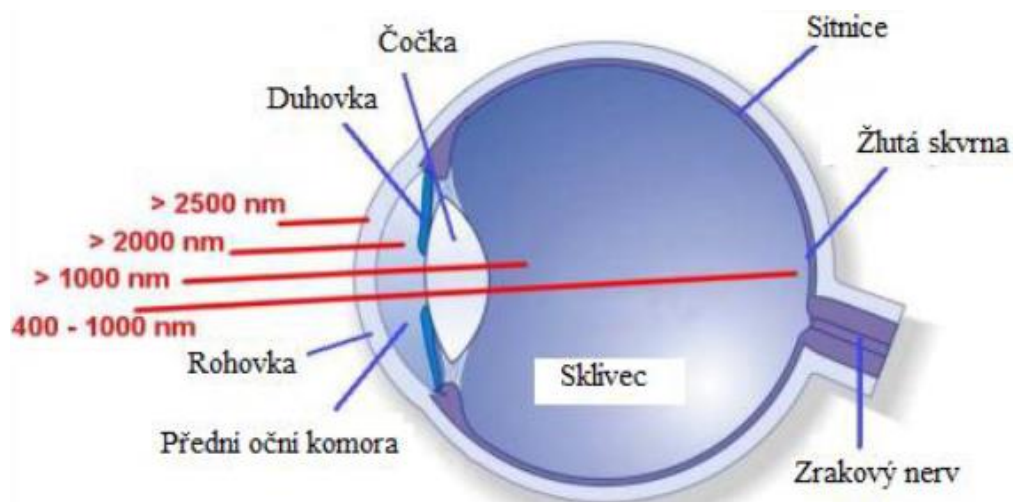
Toto poranění sítnice způsobuje modré světlo, které dopadem na sítnici vyvolává chemické reakce a někdy nevratně sítnici poškozuje. Na rozdíl od UV záření, modré světlo není pohlcováno čočkou ani rohovkou, a proniká až k sítnici. Na sítnici potom může zůstat slepé místo. Fotoretinitidu způsobuje především světlo vlnových délek 400 až 500 nm [8].

6.2.2.2 Fotodermatóza

Fotodermatóza bývá zjednodušeně nazývána alergií na sluneční záření a projevuje se svěděním, zarudnutím či vznikem puchýrků. Bývá způsobena zářením s krátkou vlnovou délkou a vysokou energií (UV záření, modré světlo). Někteří jedinci s horší tolerancí jsou k fotodermatóze náchylnější a musí se více chránit před slunečním svitem. Z umělého osvětlení nebyla fotodermatóza dosud pozorována [6].

6.2.3 Negativní účinky IR záření

Infračervené záření je záření s nízkou energií a nezpůsobuje žádné změny v molekulárních strukturách, ani nevyvolává fotochemické reakce. Působením infračerveného záření se zvyšuje teplota objektu, který je záření vystaven, včetně lidské tkáně. Z tohoto důvodu plynou zřejmá nebezpečí popálení z vystavení se nadměrnému IR záření [6].



Obr. 6-2 Propustnost IR záření okem [6]

6.2.3.1 Tepelné poranění sítnice

Jedná se o nevyléčitelné poškození, které nastává při vystavení oka velmi intenzivnímu světelnému a infračervenému záření (400 až 1400 nm). Přímým pohledem do zdroje záření může dojít k vypálení díry do sítnice bez pocitu bolesti. K poškození dochází v oblasti sítnice nejostřejšího vidění, v tzv. žluté skvrně, která je na ozáření nejcitlivější [8].

6.2.3.2 Popálení rohovky

IR záření v oblasti 1400 až $1 \cdot 10^6$ nm poškozuje větvení cév v rohovce a způsobuje mléčný zákal. K poškození dochází v řádu desítek sekund vystavení se záření, a projevuje se několik hodin potom. Rohovka se následně zhojí sama a popálení ve většině případů nezanechává následky. Problém s popálením rohovky často postihuje svářeče [6].

6.2.3.3 Zákal způsobený IR zářením

Stejně jako u zákalu způsobeném UV zářením se jedná o poškození postihující především čočku oka, a rovněž se nazývá šedý zákal. Tepelný zákal postihuje lidi, kteří se dlouhodobě vystavují silnému infračervenému záření ve spektrální oblasti IRA, případně IRB záření. Hlavním projevem poškození je zhoršené vidění. Žádný umělý světelný zdroj dosud nezpůsobil toto onemocnění [8].

6.3 Měření světelných zdrojů

Světelné zdroje musí být pro měření dostatečně zahořeny (> 100 h), aby jejich spektrální charakteristika byla stálá. Širokospektrální zdroje jsou pro měření velmi problematické, jelikož malá změna vlnové délky způsobí změny účinných hodnot spekter (např. světelné zdroje se skleněnou baňkou mají se zvyšující se vlnovou délkou i vyšší vyzářený výkon, a při snižující se vlnové délce klesá podíl UV záření). Měření záře zdrojů musí odpovídat zornému poli pozorovatele. Další faktory ovlivňující měření jsou ovlivněny prostředím (teplota, proudící vzduch, tvorba ozonu v měřící oblasti, záření z okolích zdrojů ad.), přesné podmínky pro měření stanovují buď mezinárodní normy IEC, národní normy nebo je můžeme nalézt v dokumentaci výrobce [8].

6.4 Měření intenzity ozařování

Pro měření intenzity ozařování potřebujeme plochý kruhový detektor o určitém průměru, který má spektrální odezvu pro určitou polohu v konkrétním rozsahu vlnových délek. Dále je potřeba vstupní apertura zorného pole pro monochromátor o průměru 25 mm pro zdroje s rovnoměrným vyzářováním do prostoru. Pro jiné typy zdrojů se průměr vstupní apertury pohybuje v rozsahu 7 až 50 mm. Není vhodné použít menší aperturu, než je uvedeno, jelikož by mohlo dojít k nadhodnocení nebezpečí měřeného záření.

Tuto metodu měření lze aplikovat při měření intenzity ozařování v oblasti UV-A záření E_{UVA} , v oblasti ozáření infračerveným zářením E_{IR} , v oblasti nebezpečí tepelného poškození pokožky E_H , dále se dá měřit spektrální intenzita ozáření pro výpočet mezi ozáření oka a pokožky v rozsahu 200 až 400 nm E_S a mez ozáření pro nebezpečí v důsledku ozáření sítnice modrým světlem pro malý zdroj E_B [8].

6.5 Měření záře

Optický systém, který provádí měření spektrální záře zahrnuje detektor, na který se zobrazuje zdroj záření, dále má kruhovou clonu zorného pole a vstupní aperturu o minimálním průměru 7 mm. Přístroj ukazuje průměr absolutních hodnot dopadajícího záření na jednotku plochy a na jednotku vstupního úhlu přes zorné pole přístroje.

Měřením spektrální záře ověřujeme meze nebezpečí ozáření pro nebezpečí ozáření modrým světlem L_B , pro tepelné poranění sítnice L_R , a pro tepelné poškození sítnice pro slabý zrakový vjem L_{IR} [8].

6.5.1 Alternativní metoda

Hodnotu záře lze získat i z měření intenzity ozáření, a to tak, že podělíme naměřenou hodnotu intenzity ozařování zorným polem. Clona zorného pole je umístěna u zdroje, a zorné pole je dáno poměrem průměru clony a vzdálenosti této clony od clony apertury. Výsledkem je rovinný úhel zorného pole, který musíme přepočítat na úhel prostorový. Zář následně vypočteme podělením změřené intenzity ozáření prostorovým úhlem.

Vztah pro výpočet prostorového úhlu:

$$\Omega = \frac{\pi \cdot F^2}{4 \cdot r^2} \text{ (sr)}, \quad (6.1)$$

kde F je rozměr vyzařující části světelného zdroje v metrech a r je vzdálenost zdroje od kulového integrátoru rovněž v metrech [8].

6.6 Klasifikace světelných zdrojů

Hodnoty nebezpečí naměřené intenzity ozařování nebo záře světelných zdrojů pro všeobecné osvětlování, musí být uváděny pro určitou vzdálenost, ve které je intenzita osvětlení 500 luxů. Vzdálenost však nesmí být menší než 200 mm. U ostatních světelných zdrojů se hodnoty uvádí právě pro vzdálenost 200 mm.

Na základě rizika klasifikujeme světelné zdroje následovně:

- 1) skupina bezpečných světelných zdrojů
- 2) skupina nízkého nebezpečí
- 3) skupina středního nebezpečí
- 4) skupina vysokého nebezpečí [8]

Tab. 6-2 Meze vyzařování pro skupiny nebezpečí u trvale vyzařujících zdrojů [8]

Nebezpečí	Účinné spektrum	Značka	Meze vyzařování			Jednotka
			Vyjmuté zdroje	Nízké nebezpečí	Střední nebezpečí	
Aktinické UV	$S_{UV}(\lambda)$	E_S	0,001	0,003	0,03	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
Dlouhovlnné UV	-	E_{UVA}	10	33	100	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
Modré světlo	$B(\lambda)$	L_B	100	10 000	4 000 000	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$
Modré světlo, malý zdroj	$B(\lambda)$	E_B	1	1	400	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
Tepelné poškození sítnice	$R(\lambda)$	L_R	28 000/ α	28 000/ α	71 000/ α	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$
Tep. poškoz. sítnice, slabý vizuální vjem	$R(\lambda)$	L_{IR}	6 000/ α	6 000/ α	6 000/ α	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$
Ozáření oka IR zářením	-	E_{IR}	100	570	3 200	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$

6.6.1 Skupina bezpečných světelných zdrojů

Jedná se o bezpečné zdroje, které nezpůsobí ani jedno z následujících nebezpečí:

- Aktinické UV nebezpečí (E_S) do doby ozáření 30 000 s
- Nebezpečí poškození UV zářením v blízké oblasti (E_{UVA}) do doby ozáření 1 000 s
- Nebezpečí poškození sítnice modrým světlem (L_B) do doby ozáření 10 000 s
- Nebezpečí tepelného poškození sítnice (L_R) do doby ozáření 10 s
- Nebezpečí poškození oka IR zářením (E_{IR}) do doby ozáření 1 000 s [8]

6.6.2 Skupina nízkého nebezpečí

Světelné zdroje, které za běžného provozu nezpůsobí ani jedno z následujících nebezpečí:

- Aktinické UV nebezpečí (E_S) do doby ozáření 10 000 s
- Nebezpečí poškození UV zářením v blízké oblasti (E_{UVA}) do doby ozáření 300 s
- Nebezpečí poškození sítnice modrým světlem (L_B) do doby ozáření 100 s
- Nebezpečí tepelného poškození sítnice (L_R) do doby ozáření 10 s
- Nebezpečí poškození oka IR zářením (E_{IR}) do doby ozáření 100 s [8]

6.6.3 Skupina středního nebezpečí

Světelné zdroje, u kterých meze ozáření překračují skupinu nízkého nebezpečí, ale současně nepřekračují následující hodnoty:

- Aktinické UV nebezpečí (E_S) do doby ozáření 1 000 s
- Nebezpečí poškození UV zářením v blízké oblasti (E_{UVA}) do doby ozáření 100 s
- Nebezpečí poškození sítnice modrým světlem (L_B) do doby ozáření 0,25 s
- Nebezpečí tepelného poškození sítnice (L_R) do doby ozáření 0,25 s
- Nebezpečí poškození oka IR zářením (E_{IR}) do doby ozáření 10 s [8]

6.6.4 Skupina vysokého nebezpečí

K této skupině již patří světelné zdroje, které jsou schopny svým zářením způsobit nebezpečí poranění i během krátkého času. Patří sem všechny zdroje, které svým zářením překračují meze skupiny středního nebezpečí [8].

6.7 Meze bezpečného ozáření

Tyto meze vyjadřují podmínky, při kterých by dané záření nemělo způsobit negativní účinky na lidský organismus. Každý člověk je jiný, a proto nelze tyto meze brát jako přesné, jelikož ozáření může mít na každého jedince odlišné účinky. Meze se stanovují pro normální zdravé jedince, a proto je nelze použít u osob citlivých na světlo [8].

6.7.1 Mez bezpečného ozáření kůže a oka UV zářením

$$E_S \cdot t = \sum_{200}^{400} \sum_t E_\lambda(\lambda, t) \cdot S_{UV}(\lambda) \cdot \Delta t \cdot \Delta \lambda \leq 30 J \cdot m^{-2}, \quad (6.2)$$

kde $E_\lambda(\lambda, t)$ je spektrální intenzita ozařování ve $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$, $S_{UV}(\lambda)$ je aktinická váhová funkce pro ultrafialové záření, $\Delta \lambda$ je šířka pásma v nm, t je doba ozáření v sekundách.

$$t_{max} = \frac{30}{E_S}, \quad (6.3)$$

kde t_{max} je maximální přípustná doba ozáření zdrojem v sekundách a E_S je efektivní intenzita ozáření UV zářením ve $W \cdot m^{-2}$ [8].

6.7.2 Mez bezpečného ozáření oka UVA zářením

$$E_{UVA} \cdot t = \sum_{315}^{400} \sum_t E_\lambda(\lambda, t) \cdot \Delta t \cdot \Delta \lambda \leq 10\,000 J \cdot m^{-2}, \quad (6.4)$$

kde $E_\lambda(\lambda, t)$ je spektrální intenzita ozařování ve $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$, $\Delta \lambda$ je šířka pásma v nm, t je doba ozáření v sekundách.

$$t_{max} \leq \frac{10\,000}{E_{UVA}}, \quad (6.5)$$

kde t_{max} je maximální přípustná doba ozáření zdrojem v sekundách a E_{UVA} je efektivní intenzita ozáření UVA zářením ve $W \cdot m^{-2}$ [8].

6.7.3 Mez bezpečného ozáření sítnice modrým světlem

$$L_B \cdot t = \sum_{300}^{700} \sum_t L_\lambda(\lambda, t) \cdot B(\lambda) \cdot \Delta t \cdot \Delta \lambda \leq 10^6 J \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \quad pro \ t \leq 10^4 s \quad (6.6)$$

$$L_B = \sum_{300}^{700} L_\lambda \cdot B(\lambda) \cdot \Delta \lambda \leq 100 W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \quad pro \ t > 10^4 s, \quad (6.7)$$

kde $L_\lambda(\lambda, t)$ je spektrální zář ve $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}$, $B(\lambda)$ je váhová funkce nebezpečí modrého světla, $\Delta \lambda$ je šířka pásma v nm, t je doba ozáření v sekundách.

$$t_{max} \leq \frac{10^6}{L_B}, \quad (6.8)$$

kde t_{max} je maximální přípustná doba ozáření zdrojem v sekundách a L_B je vážená zář modrého světla ve $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ [8].

6.7.4 Mez bezpečného ozáření sítnice modrým světlem - malé zdroje

Zdroje ležící pod zorným úhlem menším než 0,011 radiánů.

$$E_B \cdot t = \sum_{300}^{700} \sum_t E_\lambda(\lambda, t) \cdot B(\lambda) \cdot \Delta t \cdot \Delta \lambda \leq 100 J \cdot m^{-2} \quad pro \ t \leq 100 s \quad (6.9)$$

$$E_B = \sum_{300}^{700} E_\lambda \cdot B(\lambda) \cdot \Delta \lambda \leq 1 W \cdot m^{-2} \quad pro \ t > 100 s, \quad (6.10)$$

kde $E_\lambda(\lambda, t)$ je spektrální intenzita ozařování ve $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$, $B(\lambda)$ je váhová funkce nebezpečí modrého světla, $\Delta \lambda$ je šířka pásma v nm, t je doba ozáření v sekundách.

$$t_{max} \leq \frac{100}{E_B}, \quad (6.11)$$

kde t_{max} je maximální přípustná doba ozáření zdrojem v sekundách a E_B je vážená intenzita ozáření modrého světla ve $W \cdot m^{-2}$ [8].

6.7.5 Mez ozáření pro nebezpečí tepelného poškození sítnice

$$L_R = \sum_{380}^{1400} L_\lambda \cdot R(\lambda) \cdot \Delta\lambda \leq \frac{50\,000}{\alpha \cdot t^{0,25}} W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \quad \text{pro } 10 \mu s \leq t \leq 10 s, \quad (6.12)$$

kde L_λ je spektrální zář ve $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}$, $R(\lambda)$ je váhová funkce nebezpečí popálení, $\Delta\lambda$ je šířka pásma v nm, t je doba ozáření v sekundách, α je úhlové rozpětí v radiánech [8].

6.7.6 Mez ozáření pro nebezpečí tepelného poškození sítnice - slabý viz. vjem

Slabý vizuální vjem je vjem o jasu menším než $10 \text{ cd} \cdot m^{-2}$.

$$L_{IR} = \sum_{380}^{1400} L_\lambda \cdot R(\lambda) \cdot \Delta\lambda \leq \frac{6\,000}{\alpha} W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \quad \text{pro } t > 10 s, \quad (6.13)$$

kde L_λ je spektrální zář ve $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}$, $R(\lambda)$ je váhová funkce nebezpečí popálení, $\Delta\lambda$ je šířka pásma v nm, t je doba ozáření v sekundách, α je úhlové rozpětí v radiánech [8].

6.7.7 Mez bezpečného ozáření oka IR zářením

$$E_{IR} = \sum_{780}^{3000} E_\lambda \cdot \Delta\lambda \leq 18\,000 \cdot t^{-0,75} W \cdot m^{-2} \quad \text{pro } t \leq 1\,000 s \quad (6.14)$$

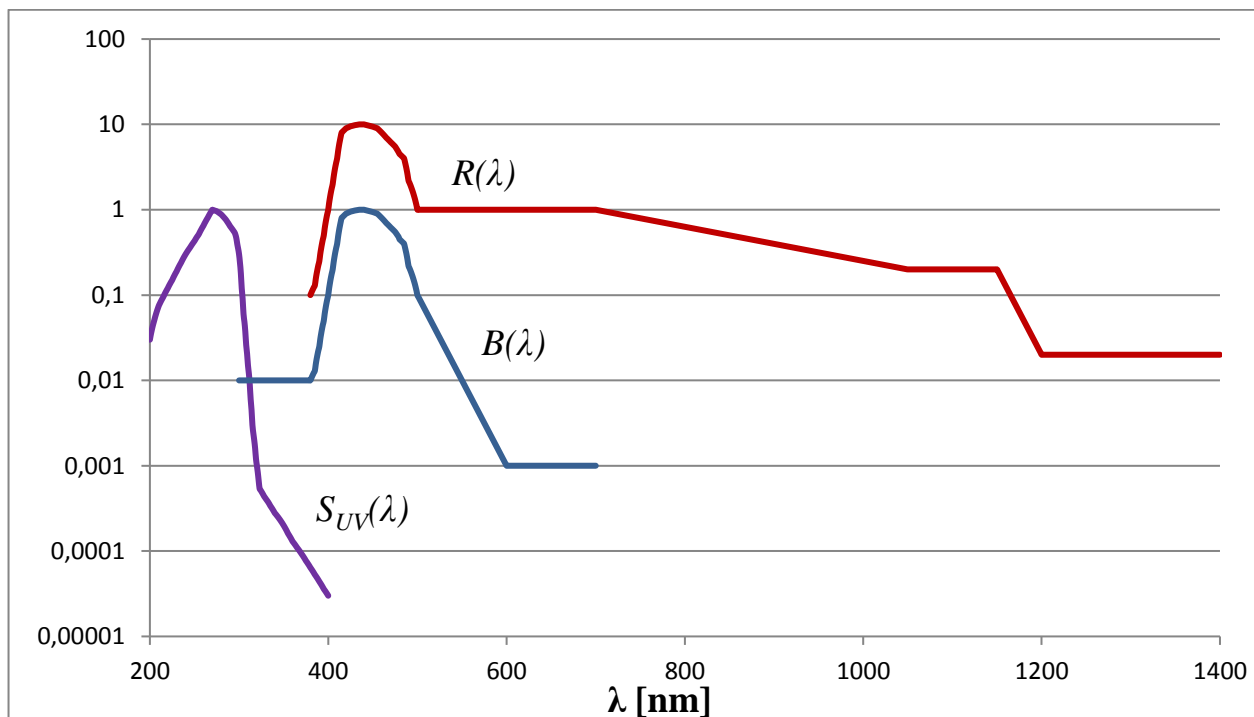
$$E_{IR} = \sum_{780}^{3000} E_\lambda \cdot \Delta\lambda \leq 100 W \cdot m^{-2} \quad \text{pro } t > 1\,000 s, \quad (6.15)$$

kde E_λ je spektrální intenzita ozařování ve $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$, $\Delta\lambda$ je šířka pásma v nm, t je doba ozáření v sekundách [8].

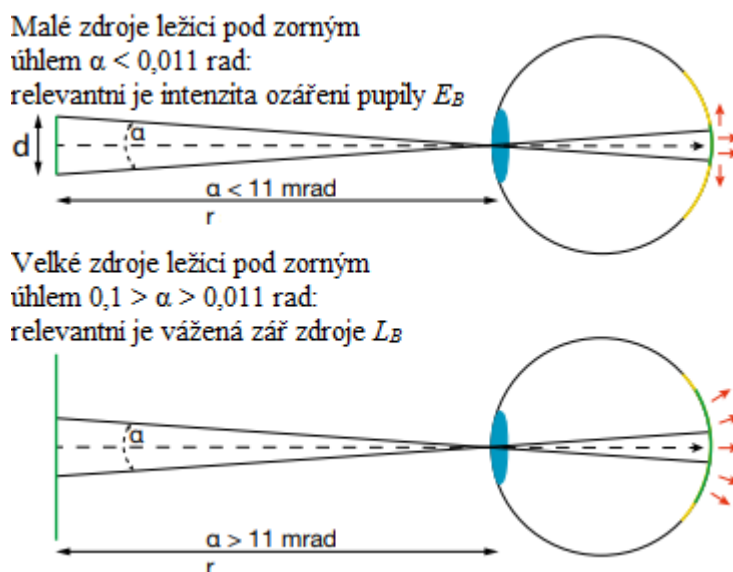
6.7.8 Mez ozáření pro nebezpečí tepelného poškození pokožky

$$E_H \cdot t = \sum_{380}^{3000} \sum_t E_\lambda(\lambda, t) \cdot \Delta t \cdot \Delta\lambda \leq 20\,000 \cdot t^{0,25} J \cdot m^{-2} \quad \text{pro } t \leq 10 s, \quad (6.16)$$

kde $E_\lambda(\lambda, t)$ je spektrální intenzita ozařování ve $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$, $\Delta\lambda$ je šířka pásma v nm, t je doba ozáření v sekundách [8].



Obr. 6-3 Spektrální váhové křivky zohledňující závislost zdravotních účinků záření na oči a kůži na vlnové délce [8]



Obr. 6-4 Význam velikosti zdroje [16]

6.8 Měřicí přístroje

Norma uvádí, že pro měření a vyhodnocování světelných zdrojů z hlediska fotobiologické bezpečnosti je vhodné použít buď dvojitý monochromátor nebo širokopásmový detektor. Díky vyšší přesnosti je doporučen spíše dvojitý monochromátor [8].

Mimo aktivně měřící techniku je třeba i dalších zařízení, např. PC pro interpretaci výsledků, kulový integrátor jako optický vstup monochromátoru, zdroj napětí ad.

6.8.1 Dvojitý monochromátor

Monochromátor dokáže z širokého pásma vlnových délek na vstupu vyselektovat a přenést úzkou část spektra na výstup. Využívá se buď optické disperze v hranolu nebo difrakční mřížky. K dosažení vyšší selektivity se užívá zapojení dvou monochromátorů do série. Dvojitého monochromátoru se užívá při měření fotobiologické bezpečnosti pro nebezpečí z UV a viditelného záření. Nevýhodou je delší doba měření [8].

6.8.2 Širokopásmový detektor

Širokopásmové detektory se využívají pro měření světelných zdrojů s nízkou intenzitou záření a pracují na principu filtrů, které porovnávají váhová spektra. Použitím kombinace dvojitého monochromátoru s širokopásmovým detektorem můžeme dosáhnout přesnější výsledků za kratší dobu měření [8].

6.8.3 Vstupní optika

Pro měření za pomoci dvojitého monochromátoru je vhodné použít vstupní optiku v podobě kulového integrátoru, aby nedošlo k nesrovnalostem mezi kalibračním a měřeným zdrojem, a také pro správné nastavení vstupních úhlů [8].

6.8.4 Kalibrační zdroje

Před měřením je nutná kalibrace přístroje jiným světelným zdrojem. Pro měření v oblasti malých vlnových délek UV záření je vhodným kalibračním zdrojem deuteriová výbojka. Pro měření záření vyšších vlnových délek se používá wolframových či wolframo-halogenových žárovek [8].

7 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ SVĚTELNÝCH ZDROJŮ A VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT

Praktická část práce spočívala především ve výběru světelných zdrojů pro měření, následném měření a vyhodnocení výsledků pomocí normy ČSN EN 62471 a jejich interpretaci. Jelikož se jedná o měření světelných zdrojů renomovaných výrobců používaných v domácnostech, které vyzařují především ve viditelné oblasti, předpokladem bylo, že by žádný ze zdrojů neměl vykazovat vyšší rizika.

7.1 Postup měření

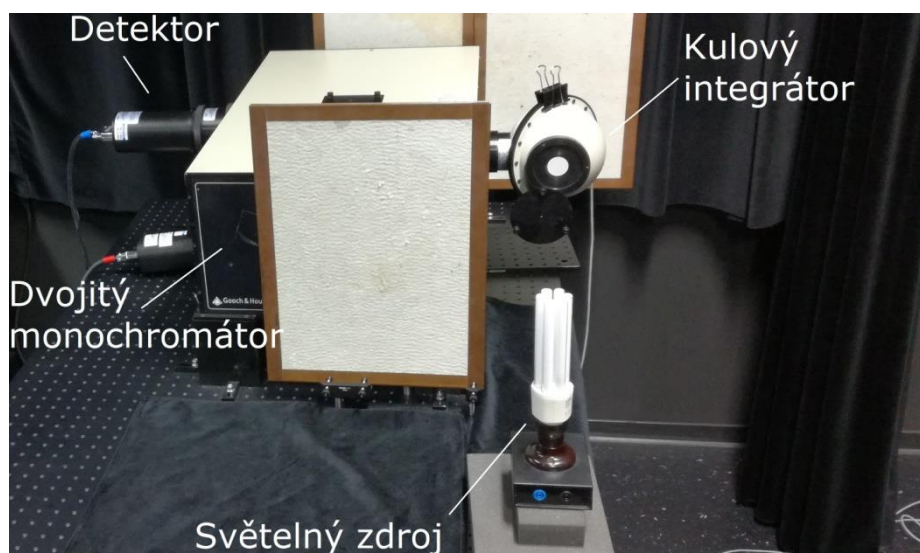
Měření probíhalo ve světelné laboratoři na ústavu elektroenergetiky, kde je k dispozici spektrometr Gooch & Housego OL 750D s dvojitým monochromátorem, který dokáže proměřit intenzitu ozařování v jednotlivých vlnových délkách, a to s krokem až 0,5 nm. Jako optický vstup do monochromátoru byl použit kulový integrátor. Pro měření vlnových délek 300-999 nm byl zkalibrován křemíkový detektor a měření v rozsahu 1000-3000 nm obstaral olovo-selenový detektor. Řídící jednotka monochromátoru byla propojena s počítačem, odkud bylo měření ovládáno. Pro napájení měřených světelných zdrojů byl použit zdroj konst. napětí APT 310XAC.

Pro měření bylo vždy důležité vyrobít konstrukci, která zajistí umístění světelného zdroje na střed apertury kulového integrátoru tak, aby ve směru na kulový integrátor byl vyzařován maximální světelný tok světelného zdroje. K dosažení přesnosti nám posloužil křížový laser Bosch. Po umístění do osy kulového integrátoru byl zapnut zdroj napětí a světelný zdroj se nechal nejméně hodinu ustalovat. Před měřením bylo ještě nutné nastavit zdroj do vzdálenosti od kulového integrátoru tak, aby na jeho vstupu byla intenzita osvětlení 500 lx, což vyplývá z normy ČSN 62471. Pro tento účel byl použit luxmetr PRC Krochmann. Nastavení osvětlenosti pomocí luxmetru bylo pouze orientační, jelikož vždy nastala odchylka mezi námi nastavenou osvětleností a osvětleností, kterou naměřil spektrometr. I tak jsme se snažili přiblížit hodnotě 500 lx na vstupu, abychom omezili odchylku při následném matematickém přepočtu. V poslední řadě bylo okolí odstíněno, tak aby nedošlo k ovlivnění měření.

Samotné měření poté probíhalo tak, že se v programu, který ovládal řídicí jednotku monochromátoru, nastavila daná kalibrace a krok měření. Následně bylo měření zahájeno. Měření v oblasti 300 až 999 nm (s krokem 1 nm) trvalo přibližně hodinu a patnáct minut a bylo provedeno minimálně dvakrát, tak aby se zajistila stálost intenzity vydávaného záření v čase. V případě, že se dvě po sobě jdoucí měření shodovala, došlo k výměně detektoru a proměření oblasti 1000 až 3000 nm s krokem 20 nm.

7.2 Vyhodnocení měření

Ze změřených spekter intenzity ozařování jednotlivých světelných zdrojů byly vypočteny meze ozáření dle vztahů uvedených výše. Následně byly zdroje zařazeny do odpovídající skupiny nebezpečí podle Tab. 6-2.

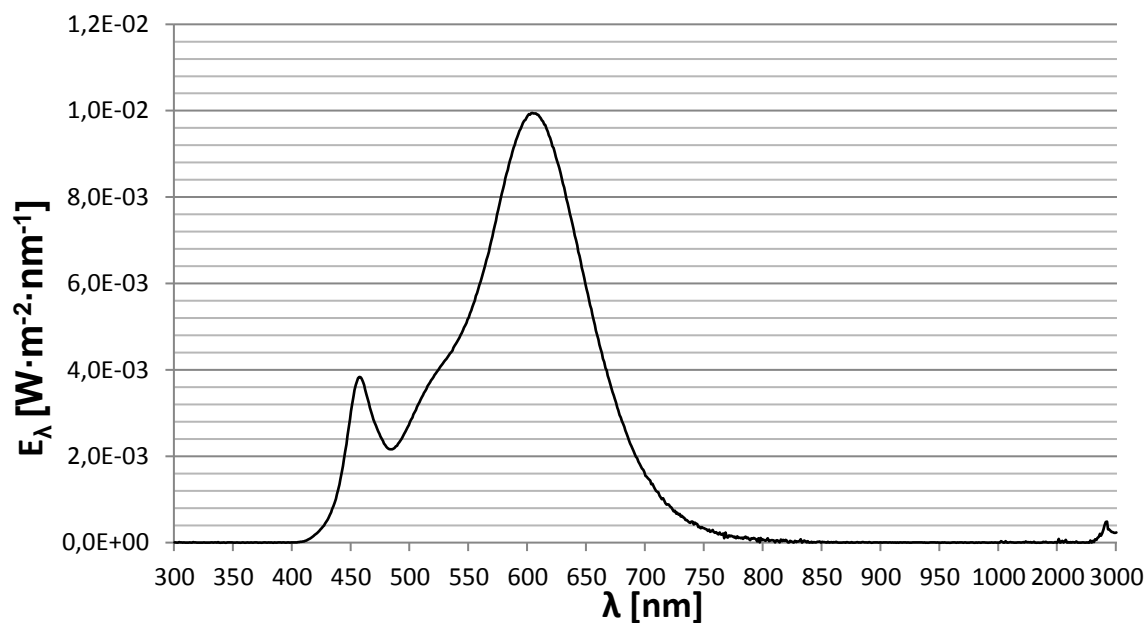


Obr. 7-1 Měřicí pracoviště - optická soustava

7.2.1 Měření LED MEGAMAN 11 W 2800 K warm white

Tab. 7-1 Parametry měření LED MEGAMAN 11 W 2800 K

Napětí	230 V
Příkon	10,5 W
Světelný tok	1055 lm
Měřeno ve vzdálenosti r	0,54 m
Rozměr F	0,0595 m



Obr. 7-2 Změřené spektrum LED MEGMAN 11 W 2800 K

Tab. 7-2 Vypočtené meze ozáření LED MEGAMAN 11 W 2800 K

E_S [W·m ⁻²]	E_{UVA} [W·m ⁻²]	L_B [W·m ⁻² ·sr ⁻¹]	L_R [W·m ⁻² ·sr ⁻¹]	E_{IR} [W·m ⁻²]
4,89E-06	1,36E-04	12,90	247,85	1,67

7.2.1.1 Příklad výpočtu

Výpočet meze pro nebezpečí ozáření UV zářením dle vztahu 6.2:

$$E_S = \sum_{300}^{400} E_{\lambda}(\lambda) \cdot S_{UV}(\lambda) \cdot \Delta\lambda = 4,89\text{E-}06 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Výsledná hodnota E_S je velmi nízká a řadí zdroj do kategorie vyjmutých zdrojů. Není nutné počítat maximální přípustnou dobu ozáření.

Výpočet meze pro nebezpečí ozáření UV-A zářením dle vztahu 6.4:

$$E_{UVA} = \sum_{315}^{400} E_{\lambda}(\lambda) \cdot \Delta\lambda = 1,36\text{E-}04 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Výsledná hodnota E_{UVA} je rovněž hluboko pod nejspodnější mezí nebezpečí a není nutné počítat maximální přípustnou dobu ozáření.

Výpočet meze pro nebezpečí ozáření sítnice modrým světlem dle vztahů 6.1 a 6.7:

$$\Omega = \frac{\pi \cdot F^2}{4 \cdot r^2} = \frac{\pi \cdot 0,0595^2}{4 \cdot 0,514^2} = 0,0105 \text{ sr},$$

kde r je vzdálenost světelného zdroje, pro dosažení $E = 500 \text{ lx}$ na vstupu kul. integrátoru.

$$L_B = \frac{\sum_{300}^{700} E_{\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda}{\Omega} = 12,90 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

Horní hranice skupiny vyjmutých zdrojů pro nebezpečí ozáření sítnice modrým světlem je $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, a tak i zde spadá měřený světelný zdroj do skupiny bezpečných zdrojů.

Výpočet meze pro nebezpečí tepelného poškození sítnice dle vztahů 6.1 a 6.7:

$$L_R = \frac{\sum_{1400}^{380} E_{\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda}{\Omega} = 247,85 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1},$$

kde $\Delta\lambda$ je pro oblast 300-999 nm zanedbána, jelikož krok měření byl roven jedné. Pro vlnové délky $\lambda > 999 \text{ nm}$, kde bylo měřeno s krokem 20 nm, je hodnota $\Delta\lambda = 20 \text{ nm}$.

Výsledek je daleko pod vrchní hranicí vyjmutých zdrojů, tzn. jedná se o bezpečný zdroj z pohledu nebezpečí tepelného poškození sítnice.

Výpočet meze pro bezpečné ozáření oka IR zářením dle vztahu 6.15:

$$E_{IR} = \sum_{780}^{3000} E_{\lambda}(\lambda) \cdot \Delta\lambda = 1,67 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Dle Tab. 6-2 je tato hodnota spadající do skupiny bezpečných zdrojů.

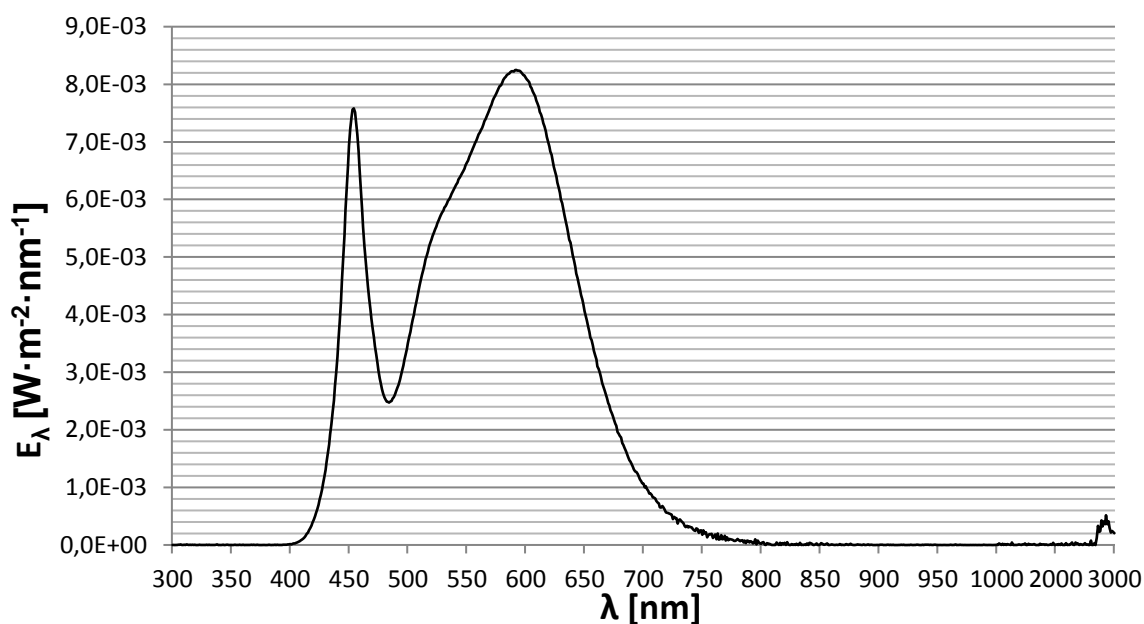
Hodnoty všech mezí ozáření zdroje LED MEGAMAN 11 W 2800 K vyšly velice nízké, nebylo tedy třeba počítat přípustné doby ozáření a tento zdroj můžeme zařadit mezi bezpečné.

U následujících vzorků budou uvedeny pouze výsledné hodnoty a zařazení zdroje do příslušné skupiny nebezpečí, případně výpočet maximální přípustné doby ozáření.

7.2.2 Měření LED MEGAMAN 11 W 4000 K cool white

Tab. 7-3 Parametry měření LED MEGAMAN 11 W 4000K

Napětí	230 V
Příkon	10,5 W
Světelný tok	1055 lm
Měřeno ve vzdálenosti r	0,665 m
Rozměr F	0,0595 m



Obr. 7-3 Změřené spektrum LED MEGAMAN 11 W 4000K

Tab. 7-4 Vypočtené meze ozáření LED MEGAMAN 11 W 4000K

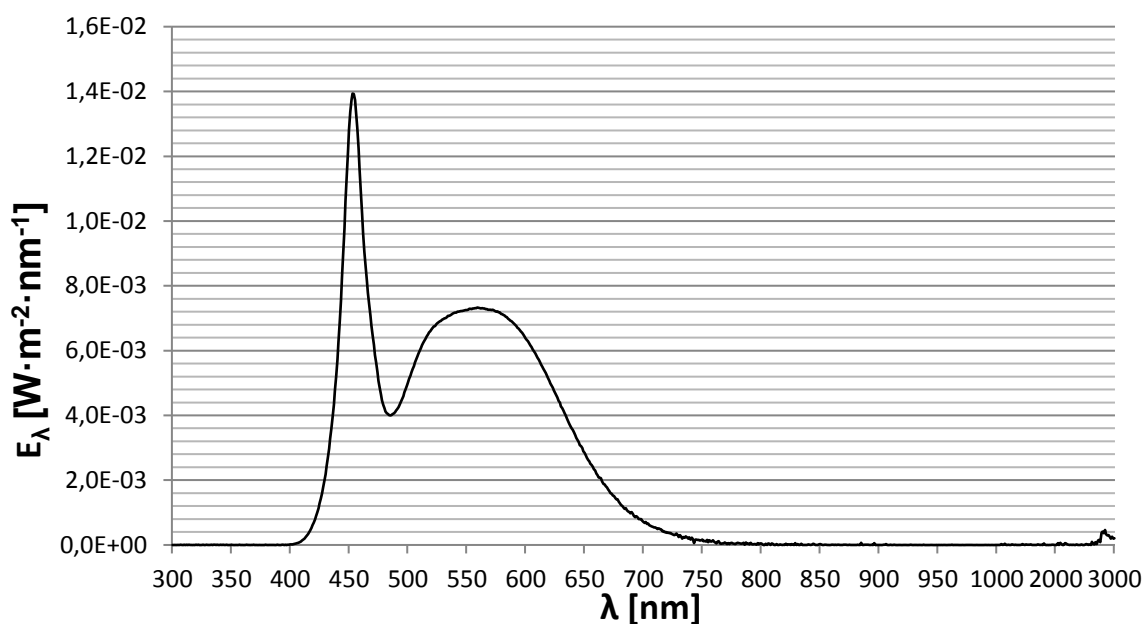
E_S [W·m ⁻²]	E_{UVA} [W·m ⁻²]	L_B [W·m ⁻² ·sr ⁻¹]	L_R [W·m ⁻² ·sr ⁻¹]	E_{IR} [W·m ⁻²]
9,50E-07	1,40E-04	34,98	509,18	1,61

Stejně jako předchozí světelný zdroj, má i tento zdroj hodnoty meze ozáření daleko od spodní hranice skupiny nízkého nebezpečí a je tedy bezpečný.

7.2.3 Měření LED MEGAMAN 11 W 6500 K day light

Tab. 7-5 Parametry měření LED MEGAMAN 11 W 6500K

Napětí	230 V
Příkon	10,5 W
Světelný tok	1055 lm
Měřeno ve vzdálenosti r	0,665 m
Rozměr F	0,0595 m



Obr. 7-4 Změřené spektrum LED MEGAMAN 11 W 6500K

Tab. 7-6 Vypočtené meze ozáření LED MEGAMAN 11 W 6500K

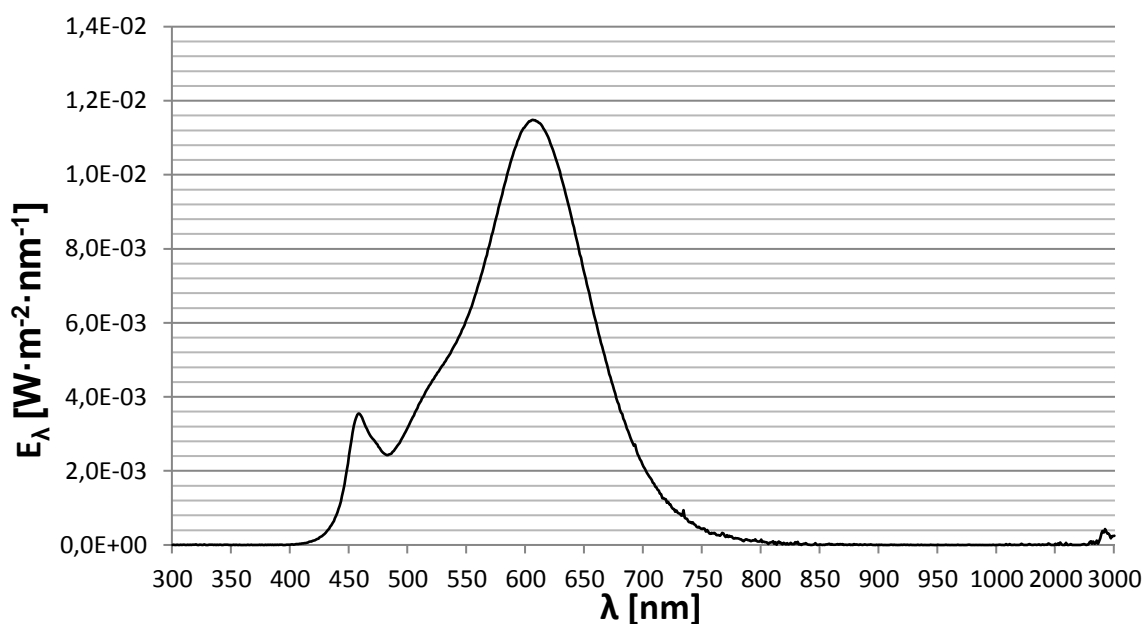
$E_S [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$	$E_{\text{UVA}} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$	$L_B [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}]$	$L_R [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}]$	$E_{\text{IR}} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$
1,21E-06	1,77E-04	60,52	744,73	1,70

Chladnější světlo přineslo nepatrné zvýšení meze pro nebezpečí ozáření modrým světlem, stále však můžeme tento světelný zdroj s rezervou zařadit do skupiny vyjmutých zdrojů.

7.2.4 Měření reflektorové LED OSRAM LED VALUE 5 W 2700 K

Tab. 7-7 Parametry měření reflektorové LED OSRAM LED VALUE 5 W 2700 K

Napětí	230 V
Příkon	5 W
Světelný tok	350 lm
Měřeno ve vzdálenosti r	1,36 m
Rozměr F	0,035 m



Obr. 7-5 Změřené spektrum reflektorové LED OSRAM LED VALUE 5 W 2700 K

Tab. 7-8 Vypočtené meze ozáření reflektorové LED OSRAM LED VALUE 5 W 2700 K

E_S [W·m ⁻²]	E_{UVA} [W·m ⁻²]	L_B [W·m ⁻² ·sr ⁻¹]	L_R [W·m ⁻² ·sr ⁻¹]	E_{IR} [W·m ⁻²]
1,83E-06	2,30E-04	215,51	4756,13	1,65

U reflektorových LED světelných zdrojů došlo ke zvýšení hodnot vážené záře L_B a L_R , z čehož právě mez pro nebezpečí fotochemického poškození sítnice modrým světlem L_B vyšla u tohoto zdroje nad spodním limitem skupiny nízkého nebezpečí ($100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$).

Výpočet maximální přípustné doby ozáření dle vztahu 6.8:

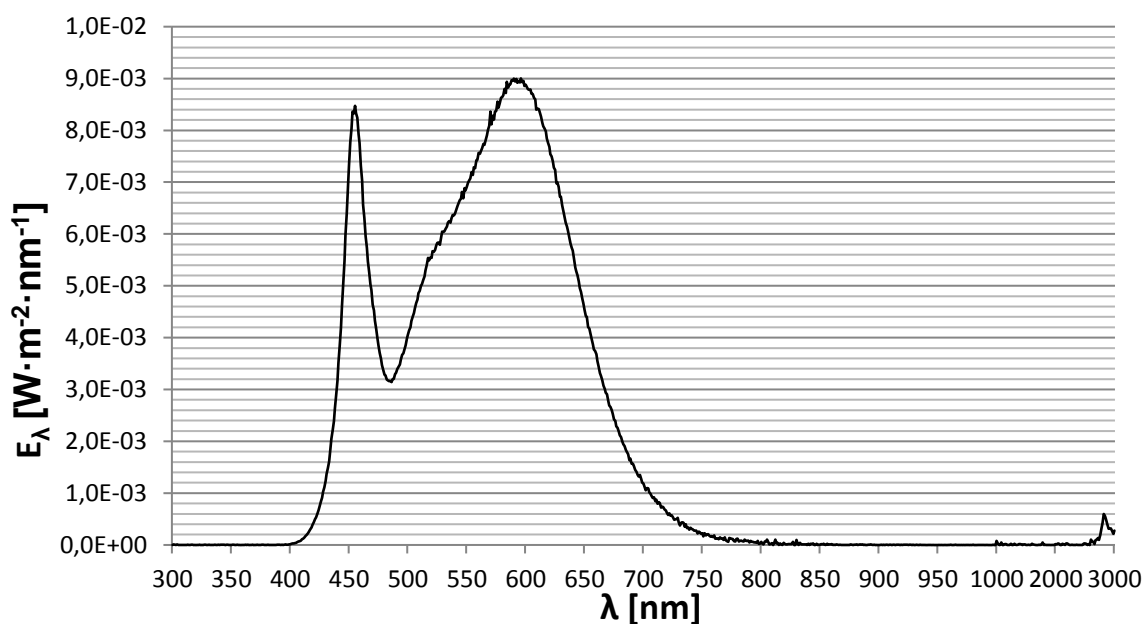
$$t_{\max} \leq \frac{10^6}{L_B} \leq \frac{10^6}{215,51} \leq 4640 \text{ s}$$

Z výsledku vidíme, že maximální přípustná doba je příliš dlouhá na to, aby mohlo dojít k poškození při standardním použití světelného zdroje. Nicméně dle normy ČSN EN 62471 se tento zdroj řadí do skupiny nízkého nebezpečí.

7.2.5 Měření reflektorové LED OSRAM LED VALUE 3,6 W 4000 K

Tab. 7-9 Parametry měření LED OSRAM LED VALUE 3,6 W 4000 K

Napětí	230 V
Příkon	3,6 W
Světelný tok	350 lm
Měřeno ve vzdálenosti r	1,28 m
Rozměr F	0,035 m



Obr. 7-6 Změřené spektrum reflektorové LED OSRAM LED VALUE 3,6 W 4000 K

Tab. 7-10 Vypočtené meze ozáření reflektorové LED OSRAM LED VALUE 3,6 W 4000 K

E_S [W·m ⁻²]	E_{UVA} [W·m ⁻²]	L_B [W·m ⁻² ·sr ⁻¹]	L_R [W·m ⁻² ·sr ⁻¹]	E_{IR} [W·m ⁻²]
3,92E-06	1,56E-04	414,45	5997,71	1,64

OSRAM LED VALUE 3,6 W 4000 K se zařadí do skupiny nízkého nebezpečí z důvodu překročení hodnoty vážené záře $L_B = 414,45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$.

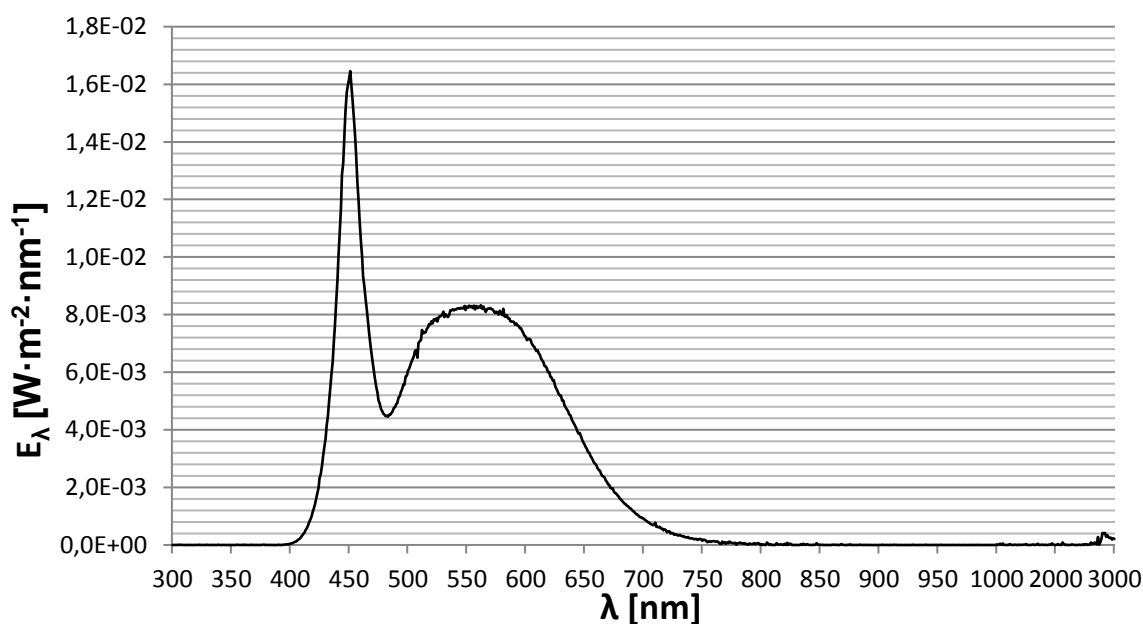
Výpočet maximální přípustné doby ozáření dle vztahu 6.8:

$$t_{\max} \leq \frac{10^6}{L_B} \leq \frac{10^6}{414,45} \leq 2413 \text{ s}$$

7.2.6 Měření reflektorové LED OSRAM LED VALUE 3,6 W 6500 K

Tab. 7-11 Parametry měření LED OSRAM LED VALUE 3,6 W 6500 K

Napětí	230 V
Příkon	3,6 W
Světelný tok	350 lm
Měřeno ve vzdálenosti r	1,215 m
Rozměr F	0,035 m



Obr. 7-7 Změřené spektrum reflektorové LED OSRAM LED VALUE 3,6 W 6500 K

Tab. 7-12 Vypočtené meze ozáření reflektorové LED OSRAM LED VALUE 3,6 W 6500 K

E_S [W·m ⁻²]	E_{UVA} [W·m ⁻²]	L_B [W·m ⁻² ·sr ⁻¹]	L_R [W·m ⁻² ·sr ⁻¹]	E_{IR} [W·m ⁻²]
4,57E-07	2,18E-04	721,14	8772,62	1,73

Reflektorová LED Osram s nejchladnější barvou světla překračuje spodní limit skupiny nízkého nebezpečí nejvýrazněji ze všech měřených světelných zdrojů, ale ani zdaleka nepřekračuje její vrchní limit (10000 W·m⁻²·sr⁻¹).

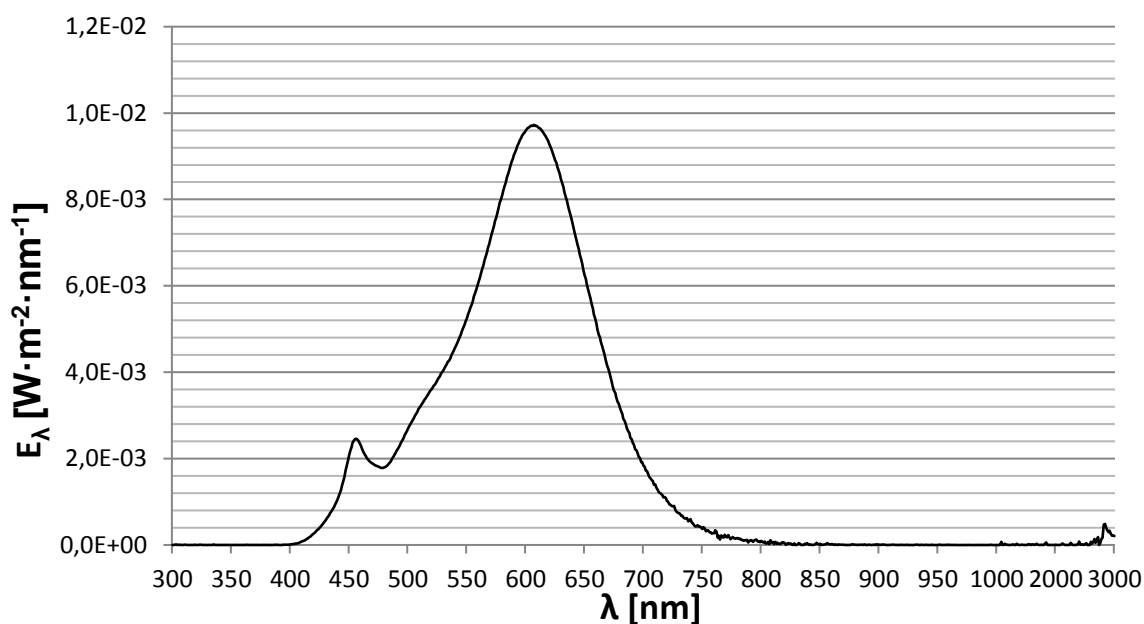
Výpočet maximální přípustné doby ozáření dle vztahu 6.8:

$$t_{\max} \leq \frac{10^6}{L_B} \leq \frac{10^6}{721,14} \leq 1387 \text{ s}$$

7.2.7 Měření LED FLAIR LED FILAMENT 2700 K warm white

Tab. 7-13 Parametry měření LED FLAIR LED FILAMENT 2700K

Napětí	230 V
Příkon	3,7 W
Světelný tok	470 lm
Měřeno ve vzdálenosti r	0,29 m
Rozměr F	0,0225 m



Obr. 7-8 Změřené spektrum LED FLAIR LED FILAMENT 2700K

Tab. 7-14 Vypočtené meze ozáření LED FLAIR LED FILAMENT 2700K

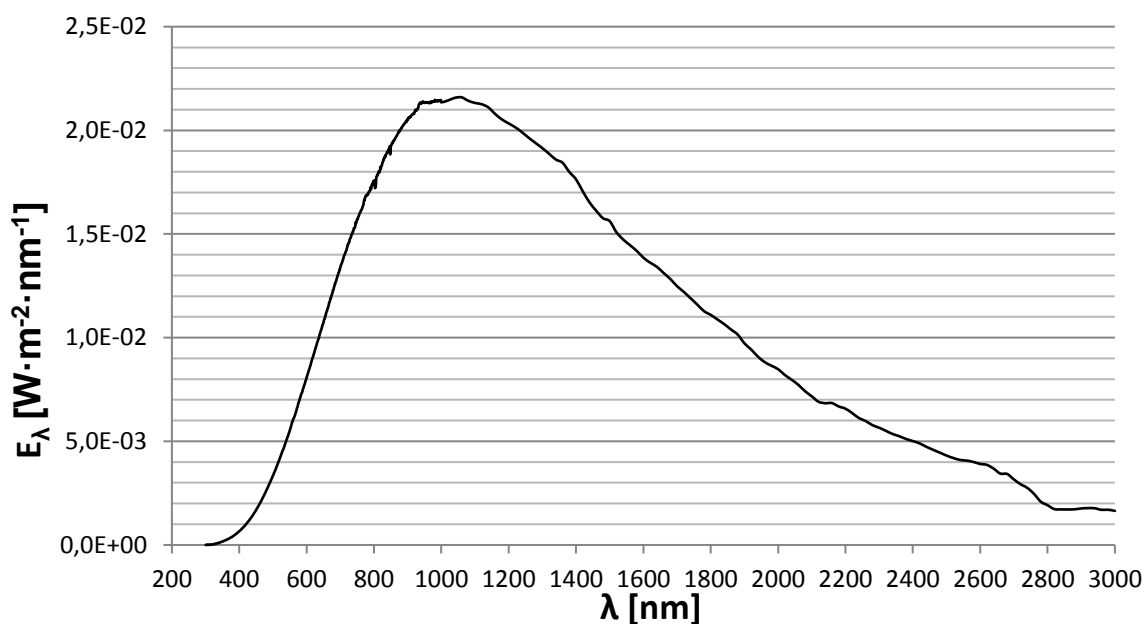
E_S [W·m ⁻²]	E_{UVA} [W·m ⁻²]	L_B [W·m ⁻² ·sr ⁻¹]	L_R [W·m ⁻² ·sr ⁻¹]	E_{IR} [W·m ⁻²]
2,41E-06	9,55E-05	19,53	439,22	1,66

Hodnoty mezí ozáření světelného zdroje LED FLAIR LED FILAMENT 2700K jsou natolik nízké, že jej řadí do skupiny vyjmutých zdrojů.

7.2.8 Měření klasické žárovky PHILIPS 60 W

Tab. 7-15 Parametry měření klasické žárovky PHILIPS 60 W

Napětí	230 V
Příkon	60,6 W
Světelný tok	710 lm
Měřeno ve vzdálenosti r	0,38 m
Rozměr F	0,02 m



Obr. 7-9 Změřené spektrum klasické žárovky PHILIPS 60 W

Tab. 7-16 Vypočtené meze ozáření klasické žárovky PHILIPS 60 W

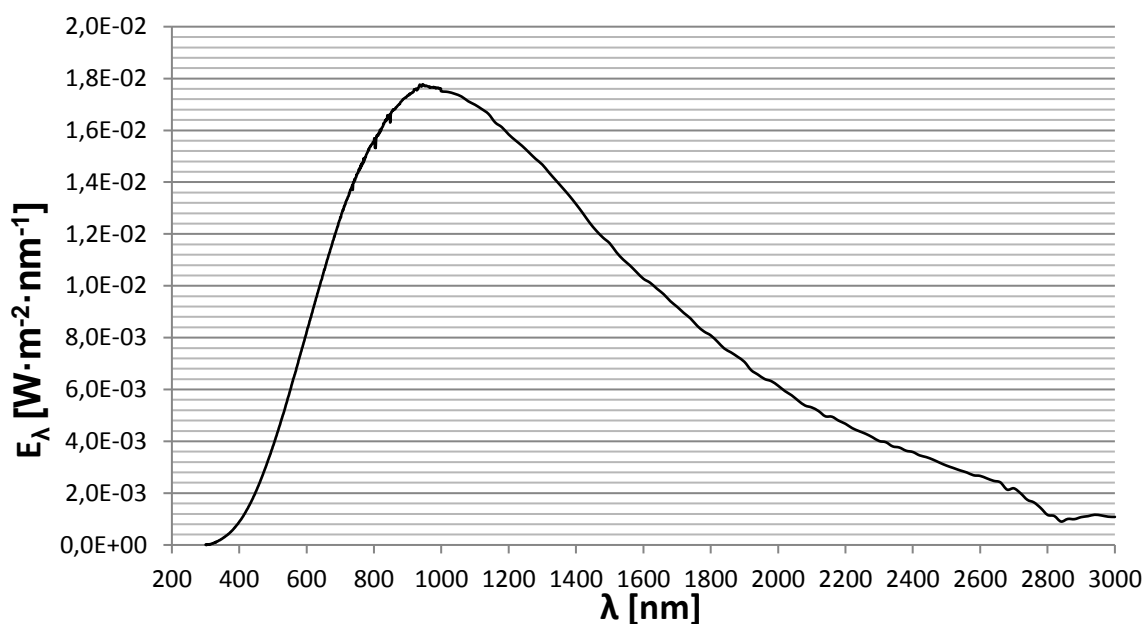
$E_S [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$	$E_{\text{UVA}} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$	$L_B [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}]$	$L_R [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}]$	$E_{\text{IR}} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$
1,05E-05	2,45E-02	53,80	3010,52	33,43

U žárovek došlo ke zvýšení hodnot mezí ozáření souvisejících s IR zářením, tedy meze pro nebezpečí tepelného poškození sítnice L_R a meze pro bezpečné ozáření oka IR zářením E_{IR} . Nicméně u této žárovky hodnoty těchto mezí, stejně jako hodnoty ostatních mezí, splňují limity vyjmutých zdrojů a klasická žárovka PHILIPS 60 W je tedy bezpečným zdrojem.

7.2.9 Měření klasické žárovky PHILIPS 200 W

Tab. 7-17 Parametry měření klasické žárovky PHILIPS 200 W

Napětí	230 V
Příkon	202 W
Světelný tok	3040 lm
Měřeno ve vzdálenosti r	0,8 m
Rozměr F	0,03 m



Obr. 7-10 Změřené spektrum klasické žárovky PHILIPS 200 W

Tab. 7-18 Vypočtené meze ozáření klasické žárovky PHILIPS 200 W

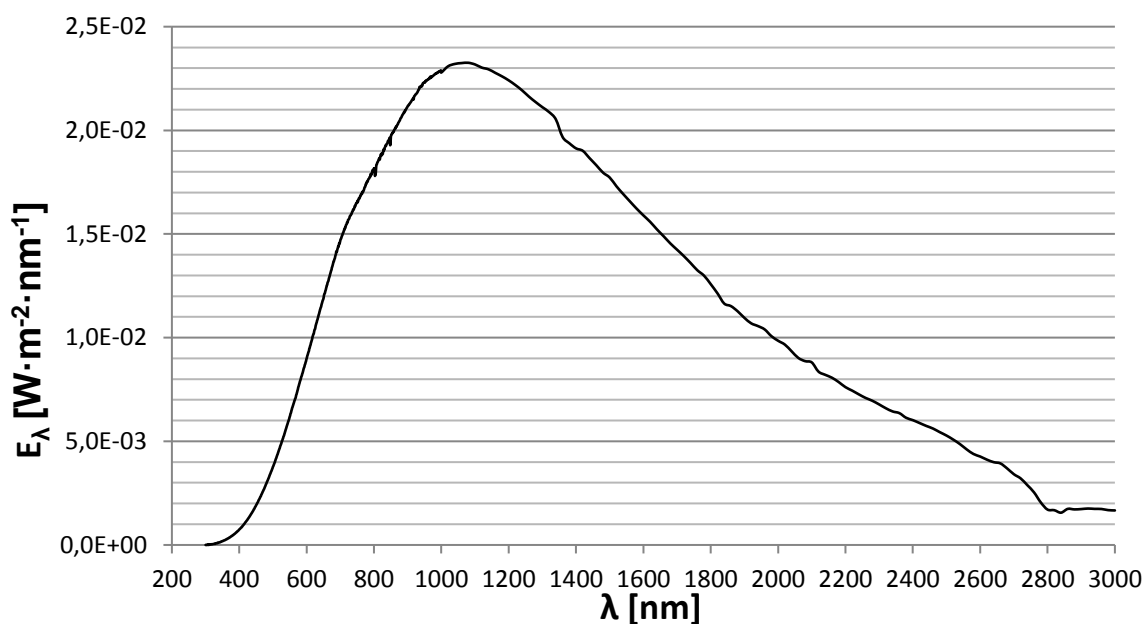
$E_S [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$	$E_{UVA} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$	$L_B [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}]$	$L_R [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}]$	$E_{IR} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$
1,53E-05	3,35E-02	128,77	5663,76	25,13

Klasická žárovka PHILIPS 200 W přesáhla jen nepatrně limit vážené záře L_B , a proto není třeba počítat maximální přípustnou dobu ozáření. Všechny ostatní hodnoty řadí tuto žárovku do skupiny bezpečných světelných zdrojů.

7.2.10 Měření reflektorové žárovky Tungsraflex R80 100 W

Tab. 7-19 Parametry měření reflektorové žárovky Tungsraflex R80 100 W

Napětí	230 V
Příkon	94,5 W
Světelný tok	-
Měřeno ve vzdálenosti r	1 m
Rozměr F	0,0766



Obr. 7-11 Změřené spektrum reflektorové žárovky Tungsraflex R80 100 W

Tab. 7-20 Vypočtené meze ozáření reflektorové žárovky Tungsraflex R80 100 W

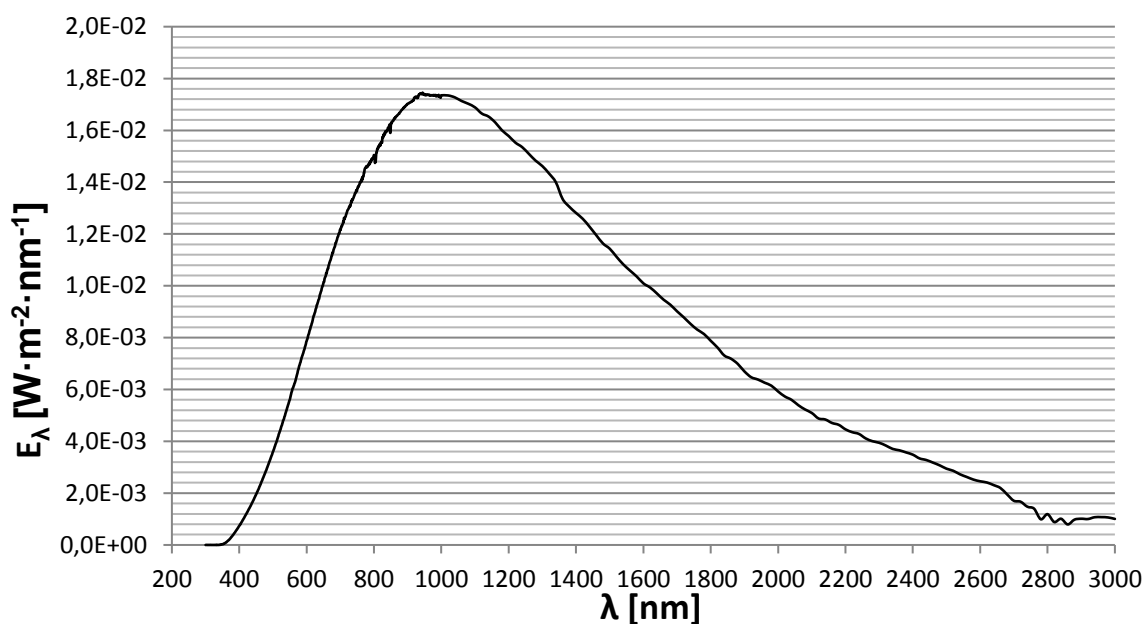
E_S [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]	E_{UVA} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]	L_B [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$]	L_R [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$]	E_{IR} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
6,59E-06	2,45E-02	28,68	1534,32	32,84

Reflektorová žárovka Tungsraflex R80 100 W splnila hodnoty skupiny vyjmutých zdrojů.

7.2.11 Měření halogenové žárovky OSRAM HALOGEN ECO 105 W 2900 K

Tab. 7-21 Parametry měření halogenové žárovky OSRAM HALOGEN ECO 105 W 2900 K

Napětí	230 V
Příkon	107,5 W
Světelný tok	1900 lm
Měřeno ve vzdálenosti r	0,62 m
Rozměr F	0,0125 m



Obr. 7-12 Změřené spektrum halogenové žárovky OSRAM HALOGEN ECO 105 W 2900 K

Tab. 7-22 Vypočtené meze ozáření halog. žárovky OSRAM HALOGEN ECO 105 W 2900 K

E_S [W·m ⁻²]	E_{UVA} [W·m ⁻²]	L_B [W·m ⁻² ·sr ⁻¹]	L_R [W·m ⁻² ·sr ⁻¹]	E_{IR} [W·m ⁻²]
2,28E-06	1,81E-02	415,59	18825,38	25,48

U halogenové žárovky OSRAM HALOGEN ECO 105 W 2900 K byla naměřena nejvyšší hodnota vážené záře $L_R = 18822,38 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ ze všech měřených zdrojů. Dle Tab. 6-2 je tato hodnota stále pod hranicí skupiny nízkého nebezpečí na tepelné poškození sítnice. Žárovka se však řadí do skupiny nízkého nebezpečí kvůli překročení limitu vážené záře L_B .

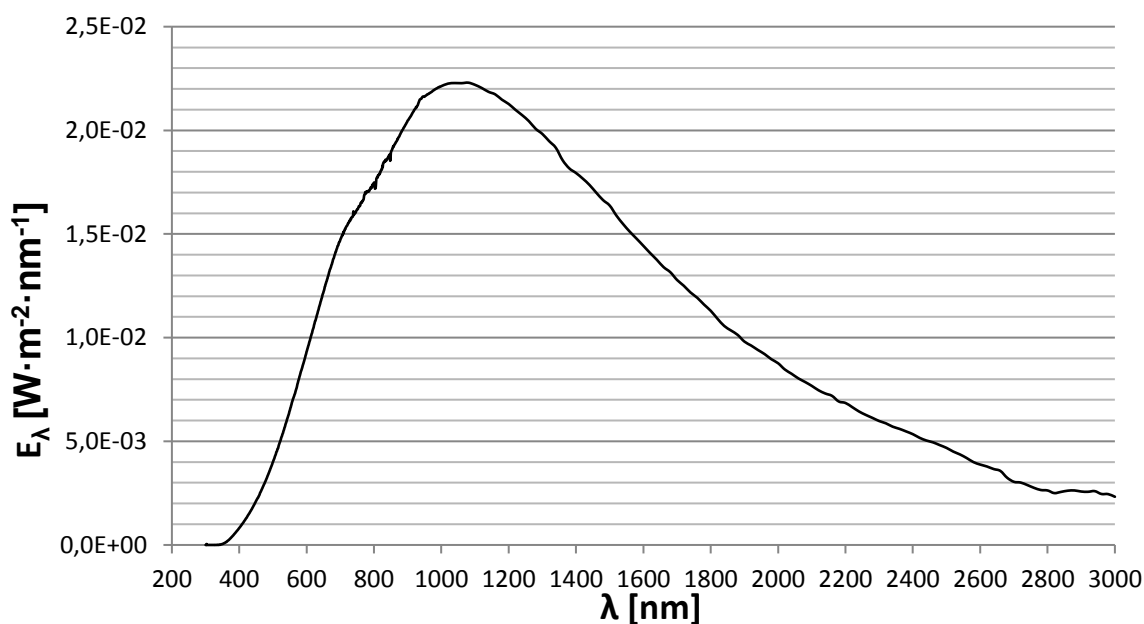
Výpočet maximální přípustné doby ozáření dle vztahu 6.8:

$$t_{\max} \leq \frac{10^6}{L_B} \leq \frac{10^6}{415,59} \leq 2406 \text{ s}$$

7.2.12 Měření ref. halog. žárovky OSRAM DECOSTAR 51 ALU 20 W 2800 K

Tab. 7-23 Parametry měření ref. halog. žárovky OSRAM DECOSTAR 51 ALU 20 W 2800 K

Napětí	12 V
Příkon	20 W
Světelný tok	210 lm
Měřeno ve vzdálenosti r	0,75 m
Rozměr F	0,04 m



Obr. 7-13 Změřené spektrum OSRAM DECOSTAR 51 ALU 20 W 2800 K

Tab. 7-24 Vypočtené meze ozáření OSRAM DECOSTAR 51 ALU 20 W 2800 K

E_S [W·m ⁻²]	E_{UVA} [W·m ⁻²]	L_B [W·m ⁻² ·sr ⁻¹]	L_R [W·m ⁻² ·sr ⁻¹]	E_{IR} [W·m ⁻²]
6,56E-06	1,84E-02	64,89	3192,89	30,04

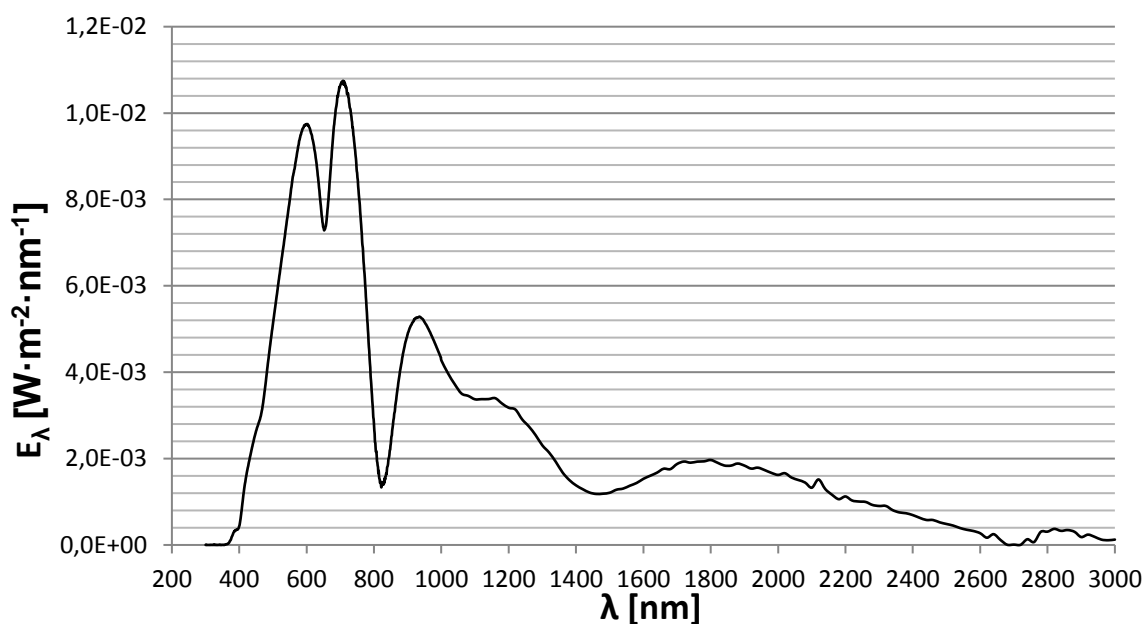
Reflektorová žárovka OSRAM DECOSTAR 51 ALU má hliníkové povrstvení, takže směrem vzad neproniká téměř žádné teplo. Nízkotlaká technologie umožňuje použití žárovky bez ochranného krytu. Teplo tak může unikat vpřed bez jakéhokoliv omezení, což lze vidět na hodnotě E_{IR} , při srovnání s následující dichroickou žárovkou, která má i přes vyšší výkon hodnotu meze pro bezpečné ozáření oka IR zářením mnohem nižší.

Naměřené a vypočtené hodnoty řadí OSRAM DECOSTAR 51 ALU 20 W 2800 K do skupiny bezpečných světelných zdrojů.

7.2.13 Měření ref. halog. žárovky OSRAM DECOSTAR 51S 50 W 2950 K

Tab. 7-25 Parametry měření ref. halog. žárovky OSRAM DECOSTAR 51S 50 W 2950 K

Napětí	12 V
Příkon	50,6 W
Světelný tok	680 lm
Měřeno ve vzdálenosti r	1,55 m
Rozměr F	0,04 m



Obr. 7-14 Změřené spektrum OSRAM DECOSTAR 51S 50 W 2950 K

Tab. 7-26 Vypočtené meze ozáření OSRAM DECOSTAR 51S 50 W 2950 K

E_S [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]	E_{UVA} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]	L_B [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$]	L_R [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$]	E_{IR} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
2,42E-06	7,49E-03	337,00	8430,03	5,72

Dichroická reflektorová žárovka OSRAM DECOSTAR 51S většinu tepla vzniklého provozem vyzařuje v zadní části reflektoru. To redukuje teplotu ve světelném svazku.

Hodnota $L_B = 337 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ spadá do skupiny nízkého nebezpečí.

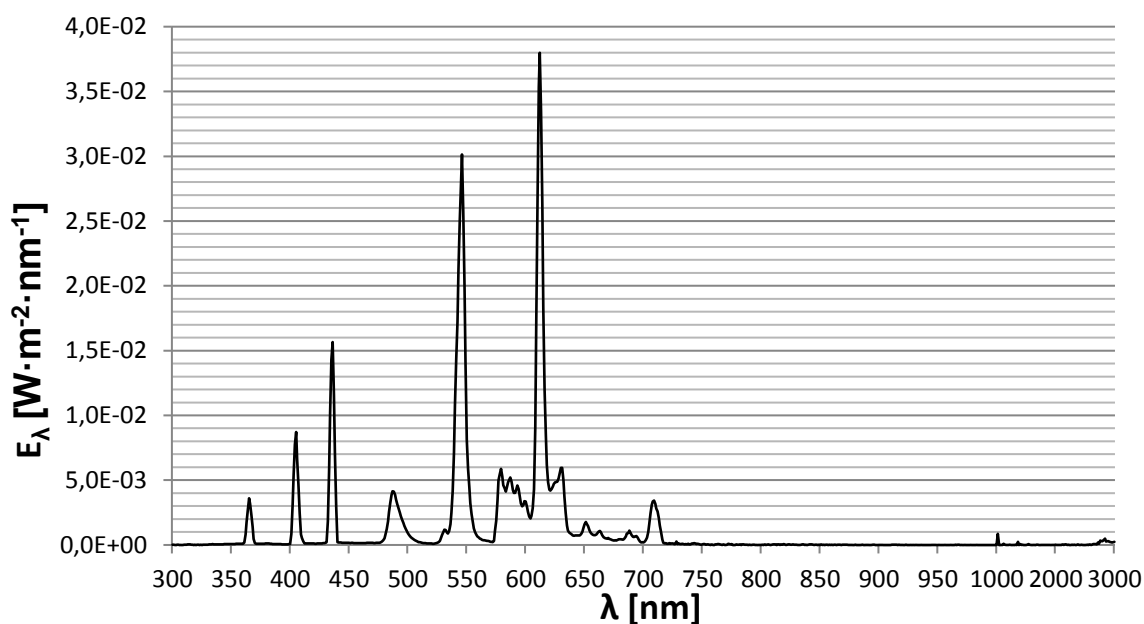
Výpočet maximální přípustné doby ozáření dle vztahu 6.8:

$$t_{\max} \leq \frac{10^6}{L_B} \leq \frac{10^6}{337} \leq 2967 \text{ s}$$

7.2.14 Měření kompaktní zářivky OSRAM ENERGY SAVER 12 W 2700 K

Tab. 7-27 Parametry měření kompaktní zářivky OSRAM ENERGY SAVER 12 W 2700 K

Napětí	230 V
Příkon	11,2 W
Světelný tok	650 lm
Měřeno ve vzdálenosti r	0,39 m
Rozměr F	0,0375 m



Obr. 7-15 Změřené spektrum kompaktní zářivky OSRAM ENERGY SAVER 12 W 2700 K

Tab. 7-28 Vypočtené meze ozáření kompaktní zářivky OSRAM ENERGY SAVER 12 W 2700 K

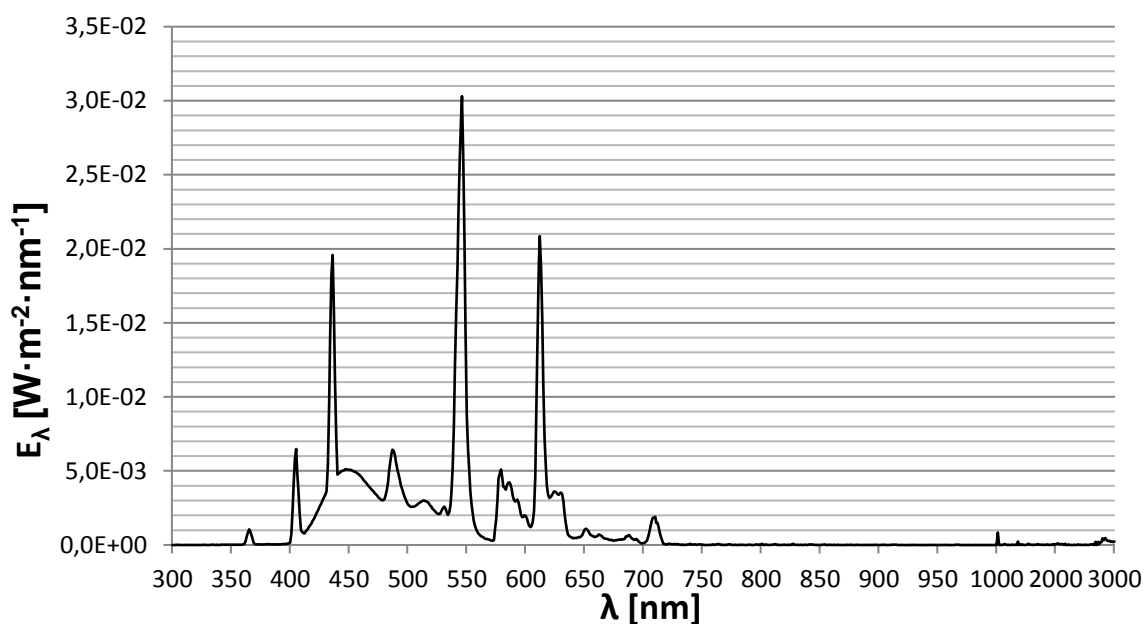
E_S [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]	E_{UVA} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]	L_B [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$]	L_R [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$]	E_{IR} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
1,90E-05	3,04E-02	14,25	245,34	1,56

Kompaktní zářivka OSRAM ENERGY SAVER 12 W 2700 K vyzařovala hlavně ve viditelné oblasti a nízké hodnoty mezí ozáření ji řadí do skupiny vyjmutých zdrojů.

7.2.15 Měření kompaktní zářivky OSRAM ENERGY SAVER 12 W 6500 K

Tab. 7-29 Parametry měření kompaktní zářivky OSRAM ENERGY SAVER 12 W 6500 K

Napětí	230 V
Příkon	11,3 W
Světelný tok	650 lm
Měřeno ve vzdálenosti r	0,39 m
Rozměr F	0,0375 m



Obr. 7-16 Změřené spektrum kompaktní zářivky OSRAM ENERGY SAVER 12 W 6500 K

Tab. 7-30 Vypočtené meze ozáření kompaktní zářivky OSRAM ENERGY SAVER 12 W 6500 K

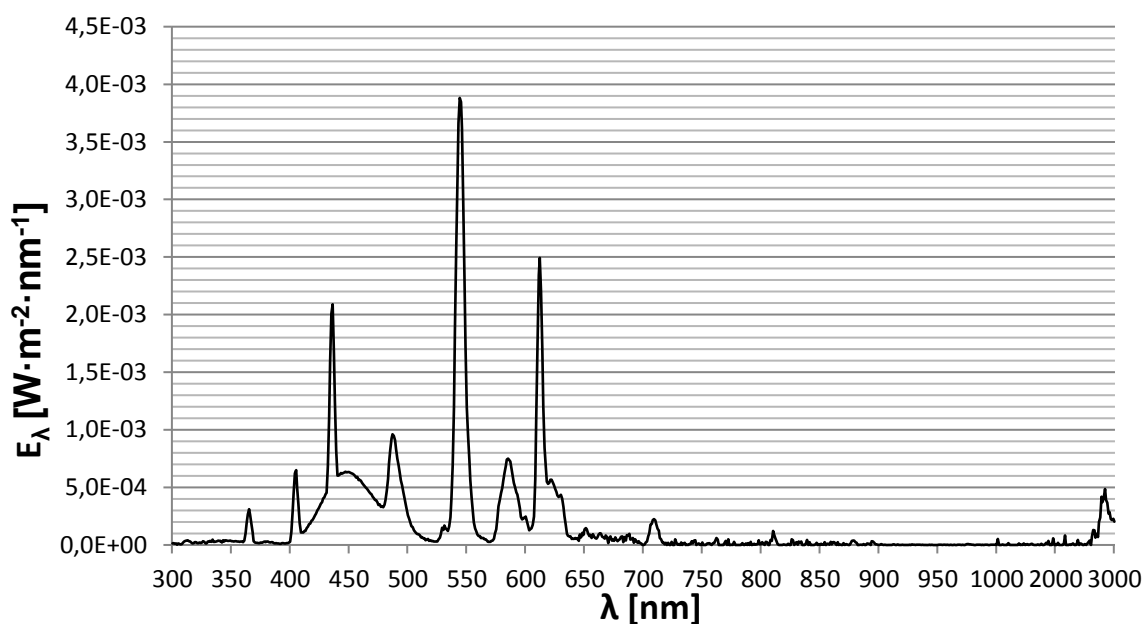
E_S [W·m ⁻²]	E_{UVA} [W·m ⁻²]	L_B [W·m ⁻² ·sr ⁻¹]	L_R [W·m ⁻² ·sr ⁻¹]	E_{IR} [W·m ⁻²]
5,41E-06	9,85E-03	44,21	526,54	1,82

I druhá kompaktní zářivka, která má pouze vyšší teplotu chromatičnosti vyzařovaného světla, dopadla dobře a patří k bezpečným světelným zdrojům.

7.2.16 Měření lineární zářivky OSRAM LUMILUX L 18 W 6500 K

Tab. 7-31 Parametry měření lineární zářivky OSRAM LUMILUX L 18 W 6500 K

Napětí	230 V
Příkon	33,8 W
Světelný tok	1300 lm
Měřeno ve vzdálenosti r	0,5 m
Rozměr F	0,05 m



Obr. 7-17 Změřené spektrum lineární zářivky OSRAM LUMILUX L 18 W 6500 K

Tab. 7-32 Vypočtené meze ozáření lineární zářivky OSRAM LUMILUX L 18 W 6500 K

E_S [W·m ⁻²]	E_{UVA} [W·m ⁻²]	L_B [W·m ⁻² ·sr ⁻¹]	L_R [W·m ⁻² ·sr ⁻¹]	E_{IR} [W·m ⁻²]
9,75E-05	2,13E-02	30,46	365,73	1,55

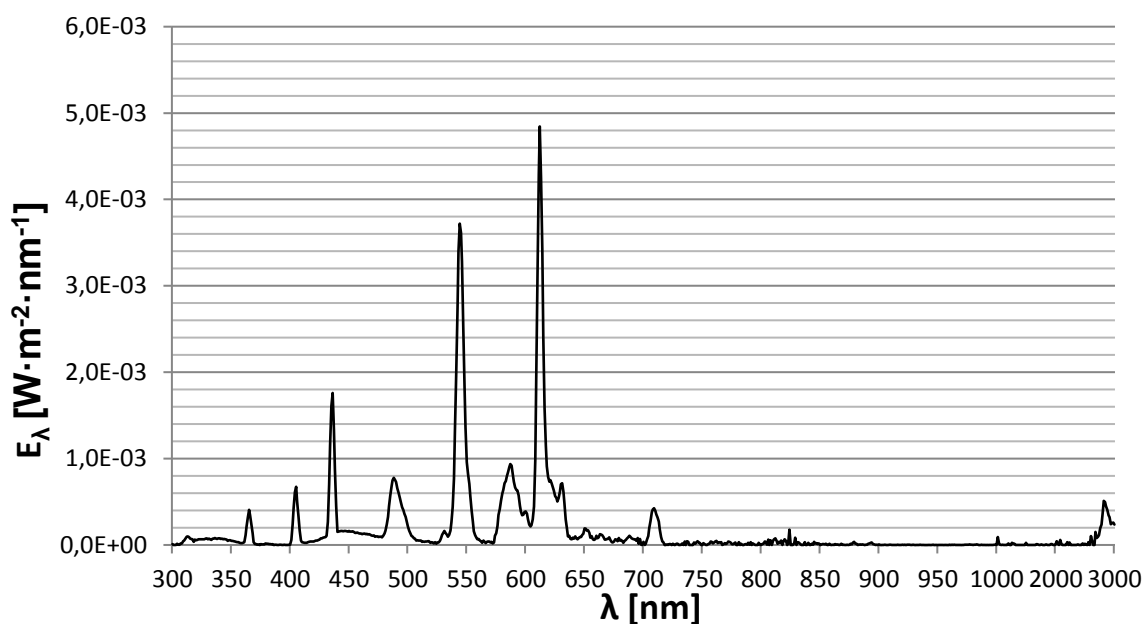
Lineární zářivka OSRAM LUMILUX L 18 W 6500 K, která byla stejně jako následující lineární zářivka měřena za pomoci clony, nedosahovala potřebné osvětlenosti 500 lx na vzdálenost $r > 20$ cm, a proto byla vyhodnocena pro osvětlenost ve vzdálenosti 20 cm.

Zářivka se zařadila do skupiny vyjmutých zdrojů.

7.2.17 Měření lineární zářivky SYLVANIA LUXLINE plus 18 W 3000 K

Tab. 7-33 Parametry měření lineární zářivky SYLVANIA LUXLINE plus 18 W 3000 K

Napětí	230 V
Příkon	33,3 W
Světelný tok	1350 lm
Měřeno ve vzdálenosti r	0,5 m
Rozměr F	0,05 m



Obr. 7-18 Změřené spektrum lineární zářivky SYLVANIA LUXLINE plus 18 W 3000 K

Tab. 7-34 Vypočtené meze ozáření lineární zářivky SYLVANIA LUXLINE plus 18 W 3000 K

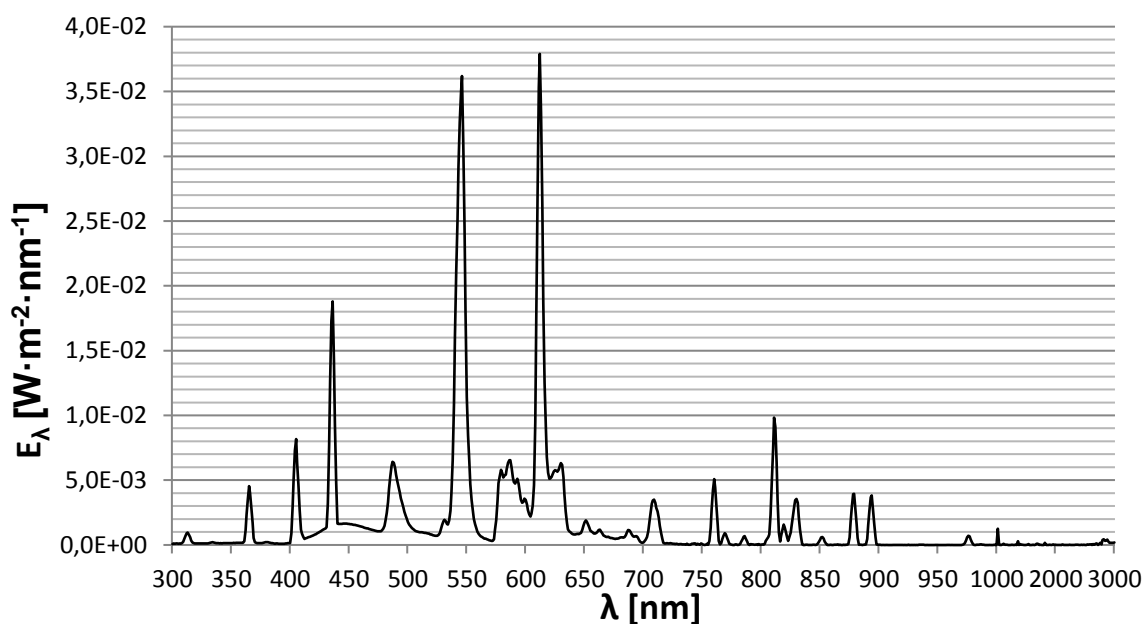
E_S [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]	E_{UVA} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]	L_B [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$]	L_R [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$]	E_{IR} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
7,24E-05	2,93E-02	13,78	213,50	1,49

Lineární zářivka SYLVANIA LUXLINE plus 18 W 3000 K vykazovala ještě nižší hodnoty mezí ozáření než lineární zářivka OSRAM, a proto je rovněž ve skupině bezpečných zdrojů.

7.2.18 Měření indukční výbojky LVD JX 15 W 220 V

Tab. 7-35 Parametry měření indukční výbojky LVD JX 15 W 220 V

Napětí	230 V
Příkon	17,9 W
Světelný tok	900 lm
Měřeno ve vzdálenosti r	0,46 m
Rozměr F	0,05 m



Obr. 7-19 Změřené spektrum indukční výbojky LVD JX 15 W 220 V

Tab. 7-36 Vypočtené meze ozáření indukční výbojky LVD JX 15 W 220 V

E_S [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]	E_{UVA} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]	L_B [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$]	L_R [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$]	E_{IR} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
1,78E-04	3,76E-02	20,16	304,45	1,72

Indukční výbojka LVD JX 15 W 220 V vyzařovala nepatrně v UV oblasti a hodnota meze pro nebezpečí ozáření UV zářením E_S je u ní nejvyšší z měřených zdrojů. Stále se však jedná o hodnotu o jeden řád nižší, než je požadovaná hodnota na zařazení zdroje do skupiny nízkého nebezpečí. Ostatní hodnoty mezí ozáření vyšly rovněž v limitu bezpečných zdrojů.

8 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce byla vypracována za účelem zjištění potencionálního optického nebezpečí světelných zdrojů používaných v domácnostech, kancelářích apod. Práce je rozdělena na část teoretickou, kde jsou shrnuty teoretické poznatky související s danou problematikou, a na část praktickou, kde jsou měřeny spektrální charakteristiky jednotlivých světelných zdrojů. Naměřená data jsou následně hodnocena dle příslušné normy ČSN.

V teoretické části práce byla vypracována literární rešerše týkající se světelných zdrojů, lidské schopnosti vidění ad. Podstatná část práce se věnuje fotobiologické bezpečnosti – vlivům záření na člověka, metodě měření a vyhodnocení zdrojů z hlediska fotobiologické bezpečnosti podle kritérií, které udává norma ČSN EN 62471. Na základě teoretické části práce byly také vybrány světelné zdroje, na kterých bylo měření provedeno.

Praktická část práce zahrnuje postup měření světelných zdrojů, kde jsou uvedeny použité měřicí přístroje, reálný postup měření, a také naměřené spektrální charakteristiky jednotlivých zdrojů. Dále je zde uveden příklad výpočtu mezí ozáření a vyhodnocení světelných zdrojů na základě nebezpečí, které představují.

Vzhledem k tomu, že se jedná o běžně dostupné světelné zdroje vyzařující především ve viditelné oblasti spektra, nebyl žádný ze zdrojů vyhodnocen jako středně či vysoce nebezpečný. Téměř všechny zdroje splnily limity mezí ozáření tak, aby mohly být zařazeny do skupiny vyjmutých, tedy bezpečných zdrojů. Žádný ze zdrojů nevyzařoval v oblasti UV či IR záření s takovou intenzitou, aby překročil limity mezí E_S , E_{UVA} , L_R , E_{IR} . Jediná mez, kterou některé zdroje překročily, byla mez pro nebezpečí ozáření modrým světlem L_B , která byla vyšší především u reflektorových zdrojů LED. Nejvyšší hodnota vážené záře $L_B = 721,14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ byla vypočtena u zdroje OSRAM LED VALUE 3,6 W 6500 K, ale maximální přípustná doba ozáření $t_{max} = 1387 \text{ s}$ je tak dlouhá doba, že za běžných podmínek není ani tento zdroj nikterak nebezpečný, což odpovídá zařazení do skupiny nízkého nebezpečí. Další zdroje, které překročili spodní hranici skupiny nízkého nebezpečí pro mez ozáření modrým světlem, byly ostatní reflektorové LED OSRAM s odlišnou teplotou chromatičnosti, dále halogenová žárovka OSRAM ECO 105 W 2900 K, reflektorová halogenová žárovka OSRAM DECOSTAR 51S 50 W 2950 K a v poslední řadě klasická žárovka PHILIPS 200 W. Podle normy tyto zdroje spadají do skupiny nízkého nebezpečí, ale reálně jsou všechny zdroje bezpečné, neboť doba, po které by mohlo dojít k poranění, je příliš dlouhá. Zdroje s vyšší hodnotou vážené záře modrého světla L_B mohou ovšem negativně ovlivnit cirkadiánní rytmy, proto není vhodné jejich použití při osvětlení prostor, ve kterých se pohybujeme v pozdních hodinách (popsáno v kapitole 6.1.2.).

Tato práce se zabývala riziky přímého pohledu do světelného zdroje, nicméně v běžné praxi k přímému pohledu dochází minimálně, jelikož světelný zdroj bývá součástí svítidla, které světelný tok směřuje tak, aby k tomuto jevu nedocházelo. Součástí svítidla je ve většině případů i stínidlo. Použití zdroje ve svítidle by mělo mít efekt navýšení fotobiologické bezpečnosti, a nemělo by naopak dojít k negativnímu ovlivnění. Dalším důležitým faktorem ovlivňujícím bezpečnost světelného zdroje je způsob jeho použití a umístění. Může dojít k expozici na nižší vzdálenosti, tím pádem vystavení oka či kůže vyšší intenzitě záření, než která byla vzata v potaz při vyhodnocení světelných zdrojů v této práci dle normy EN 62471.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HABEL, Jiří. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [2] STEINBAUER, Miloslav. *Moderní světelné zdroje a jejich aplikace* [online]. UTEE FEKT VUT Brno, 2016 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <http://www.utee.feec.vutbr.cz/iet/wp-content/uploads/sites/2/2016/10/OsvetlovaniAZdroje.pdf>
- [3] SOKANSKÝ, Karel. *Světelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04941-9.
- [4] DRÁPELA J. *skripta BUEE: Světelné zdroje a osvětlování*, FEKT VUT v Brně, 2013.
- [5] SOKANSKÝ, Karel. *Základy základů světelné techniky* [online]. Ostrava, 2007 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/vuee/VUEE_Zaklady_svetelne_techiky.pdf
- [6] ŠTĚPÁNEK, J. *Fotobiologická bezpečnost světelných zdrojů a osvětlovacích soustav*. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2014, 72 stran.
- [7] Prezentace a materiály serveru PowerWiki: *Elektroenergetika - Světlo* [online]. Praha: FEL ČVUT, 1999 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://www.powerwiki.cz/wiki/Svetlo>
- [8] ČSN EN 62471. *Fotobiologická bezpečnost světelných zdrojů a soustav světelných zdrojů*. Ústav pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [9] PŘÍSPĚVATELÉ WIKISKRIPT. *Radiometrické a fotometrické veličiny* [online]. WikiSkripta, projekt sítě lékařských fakult MEFANET [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Radiometrick%C3%A9_a_fotometrick%C3%A9_veli%C4%8Diny
- [10] PŘÍSPĚVATELÉ WIKIPEDIE. Light-emitting diode. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode
- [11] Bönischová, J. *Sociální rehabilitace osob se zrakovým postižením, s akcentem na prostorovou orientaci a samostatný pohyb*. [online] Diplomová práce. Olomouc: Ústav speciálněpedagogických studií pedagogické fakulty v Olomouci, 2016, 72 stran. Dostupné z: https://theses.cz/id/copirq/DP_Bnischov_Jana.pdf
- [12] *VYBÍRÁME TRIEDR - 3.část. Skutečná transmise a její správná interpretace* [online]. 2000 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <http://posec.astro.cz/index.php/clanky/teorie/22-aparatbasic/104-vybirame-triedr-3-cast-skutecna-transmise-a-jeji-spravna-interpretace>
- [13] BULLOUGH, John D., Andrew BIERMAN a Mark S. REA. *Evaluating the blue-light hazard from solid state lighting*. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics [online]. Taylor & Francis, 2019, **25**(2), 311-320 [cit. 2019-05-15]. DOI: 10.1080/10803548.2017.1375172. ISSN 1080-3548. Dostupné z: <https://www-tandfonline-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/doi/full/10.1080/10803548.2017.1375172?scroll=top&needAccess=true>
- [14] DVOŘÁK, P. *Vliv modrého světla na lidský organismus*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 78 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jaroslav Štěpánek.

-
- [15] Holzman DC. What's in a color? The unique human health effect of blue light. *Environ Health Perspect.* 2010;118(1):A22–A27. doi:10.1289/ehp.118-a22. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2831986/>
- [16] *Details on photobiological safety of LED light sources* [online]. [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: https://media.osram.info/im/img/osram-dam-2496608//AN002_Details_on_Photobiological_Safety_of_LED_Light_Sources.pdf
- [17] *Photobiological Safety In Lighting Applications* [online]. Bentham.co.uk [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://www.bentham.co.uk/applications/application-search/photobiological-safety-in-lighting-applications-14/>
- [18] *Pupil lumen* [online]. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <http://www.tzlight.com/technology/pupil-lumen>
- [19] *Fluorescent Light Spectrum* [online]. [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://www.liveaquaria.com/images/general/mofo-21157-spectrum-graph.jpg>
- [20] LYONS, Leslie. *Photobiological safety: ASSESSMENT VALUES* [online]. March 2018 [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://dvd.ilphotonics.com/Bentham%20-%20monochrometers%20-%20monochromator%20systems/General%20Info/PSL%20Article%20-%2018%2018-22.pdf>